

196
Aus der Universitäts-Augenklinik Marburg a. d. Lahn

Direktor: Professor Dr. med. W. Straub

MARBURG

Beobachtungen über das unterschiedliche
Verhalten des Flimmer-Elektroretinogramms
des Menschen bei verschiedener Beleuchtung

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin der Hohen Medizinischen Fakultät
der Philipps - Universität zu Marburg

vorgelegt von

Elke Groscurth

aus Kassel

Marburg 1968

Beobachtungen über das unterschiedliche
Verhalten des Flimmer-Elektroretinogramms
des Menschen bei verschiedener Beleuchtung

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin der Hohen Medizinischen Fakultät
der Philipps - Universität zu Marburg

vorgelegt von

Elke Groscurth

aus Kassel

Marburg 1968

Angenommen von der Medizinischen Fakultät
der Universität Marburg am: 29.1.1968
gedruckt mit Genehmigung der Fakultät

Dekan: Prof. Dr.med. R. Siegert
Referent: Prof. Dr.med. W. Straub
Correferent: Doz. Dr.med. W. Aust

Inhaltsverzeichnis

	Seite
<u>Einleitung</u>	
I. das Einzelblitz-ERG	1
1. Entwicklung des ERGs und Phasenanalyse	
2. Entstehung des ERGs	2
3. Beeinflussung des ERGs durch Intensität und Adaptation	3
II. das Flimmer-ERG unter Berücksichtigung der geschichtlichen Entwicklung	
1. Reizung mit Flimmerlicht im Gegensatz zum klinischen Einzel-ERG Bedeutung für Forschung und Klinik	
2. das Flimmer-ERG zur Objektivierung des zeitlichen Auflösungsvermögens der Retina	5
a) Anfänge der Flimmerelektroretinographie	
b) Feststellung der FVF beim Menschen (subjektive und objektive FVF)	
c) Möglichkeiten der fehlerhaften Ablesung der FVF	6
d) Abhängigkeit der FVF	7
3. Flimmer-ERG und Adaptation	
a) der Ursprung in den nervösen Elementen, d.h. den Rezeptoren Einteilung in E- und I-Typen	
b) Abhängigkeit des Flimmer-ERGs vom Adaptationszustand	8
α) der Effekt der Helladaptation bei intermittierender Lichtreizung	
β) Versuche über den Adaptationszustand von DODT und HECK	9
γ) der "non flickering part"	10
4. Flimmer-ERG und Reizintensität	11
a) das skotopische Flimmer-ERG	
b) das gemischte Flimmer-ERG	12
c) das photopische Flimmer-ERG	
5. Flimmer-ERG und Reizfrequenz	
a) Flimmerwellenamplitude u. Phasenanalyse	13

b) Besonderheiten des off-Effektes	Seite
c) das Verhalten der Initialwellen	14
III. Fragestellung	15

Methodik

I. Apparatur	17
1. Haftschale	
2. Vorverstärkung	
3. Hauptverstärkung	
4. Registrierung	
5. Lichtreizung	
6. Untersuchungsplatz	19
II. Ausmessung	
III. Statistische Auswertung	20
IV. Patientengut	
V. Durchführung der Versuche	
1. Adaptation	21
a) Dunkeladaptation	
b) Helladaptation	
2. Flimmerlichtreizung	
a) verschiedene Intensitäten	
b) verschiedene Wellenlängen	

Ergebnisse

I. Ergebnisse bei Dunkeladaptation und Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten	23
1. Flimmerwellen	
a) Amplitude der Flimmerwellen	
α) Abhängigkeit von der Intensität	
β) Abhängigkeit von der Frequenz	
b) Form und Aussehen der Flimmerwellen	24
c) Statistik	28
2. initiale a-Wellen	
a) Amplitude der initialen a-Wellen	
α) Abhängigkeit von der Intensität	29
β) Abhängigkeit von der Frequenz	
b) Form und Aussehen der initialen a-Wellen	
c) Statistik	31
3. initiale x(b)-Wellen	
a) Amplitude der initialen x(b)-Wellen	
α) Abhängigkeit von der Intensität	

β) Abhängigkeit von der Frequenz	Seite
b) Form und Aussehen der Initialen x(b)-Wellen	33
c) Statistik	
II. Ergebnisse bei Dunkeladaptation und Farblicht- reizung	36
1. Flimmerwellen	
a) Amplitude der Flimmerwellen	
α) Abhängigkeit von der Frequenz	
β) Abhängigkeit von der Wellenlänge	38
b) Form und Aussehen der Flimmerwellen	
c) Statistik	40
2. initiale a-Wellen	42
a) Amplitude der initialen a-Wellen	
α) Abhängigkeit von der Frequenz	
β) Abhängigkeit von der Wellenlänge	
b) Form und Aussehen der initialen a-Wellen	
c) Statistik	
3. positive Initialwellen	43
a) Amplitude der positiven Initialwellen	
α) Abhängigkeit von der Frequenz	
β) Abhängigkeit von der Wellenlänge	45
b) Form und Aussehen der positiven Initial- wellen	
c) Statistik	
III. Ergebnisse der Helladaptation und Reizung mit verschiedenen Intensitäten	46
1. Flimmerwellen	
a) Amplitude der Flimmerwellen	
α) Abhängigkeit von der Intensität	
β) Abhängigkeit von der Frequenz	48
b) Form und Aussehen der Flimmerwellen	
c) Statistik	50
2. initiale a-Wellen	52
a) Amplitude der initialen a-Wellen	
α) Abhängigkeit von der Intensität	
β) Abhängigkeit von der Frequenz	
b) Form und Aussehen der initialen a-Wellen	
c) Statistik	

	Seite
3. initiale x-Wellen	54
a) Amplitude der initialen x-Wellen	
α) Abhängigkeit von der Intensität	
β) Abhängigkeit von der Frequenz	
b) Form und Aussehen der initialen x-Wellen	56
c) Statistik	
IV. Ergebnisse bei Helladaptation und Farblichtreizung	58
1. Flimmerwellen	
a) Amplitude der Flimmerwellen	
α) Abhängigkeit von der Frequenz	
β) Abhängigkeit von der Wellenlänge	
b) Form und Aussehen der Flimmerwellen	
c) Statistik	59
2. initiale a-Wellen	
a) Amplitude der initialen a-Wellen	
α) Abhängigkeit von der Frequenz	
β) Abhängigkeit von der Wellenlänge	61
b) Form und Aussehen der initialen a-Wellen	
c) Statistik	
3. initiale x-Wellen	
a) Amplitude der initialen x-Wellen	
α) Abhängigkeit von der Frequenz	
β) Abhängigkeit von der Wellenlänge	62
b) Form und Aussehen der initialen x-Wellen	
c) Statistik	
V. Ergebnisse bei mesopischer Adaptation und Reizung mit verschiedenen Intensitäten und Farblichtern	65
1. verschiedene Intensitäten	
a) Amplitudenhöhe der Flimmerwellen	
b) Form und Aussehen der Flimmerwellen	
2. Farblichtreizung	
a) Amplitudenhöhe der Flimmerwellen	
b) Form und Aussehen der Flimmerwellen	66
3. initiale Antworten	
VI. Statistik der Mittelwertsdifferenzen	68

	Seite
<u>Diskussion</u>	70
Besprechung der Ergebnisse	
1. Flimmerwellen	
a) Einfluß der Adaptation auf die Amplitude der Flimmerwellen	
b) Frequenzabhängigkeit der Flimmerwellenamplitude	71
c) Einfluß der Adaptation auf die Form der Flimmerwellen	73
d) alternierendes Flimmern als Ausdruck der Adaptation	75
2. initiale Antworten	
a) Einfluß der Adaptation auf die Amplitude der initialen Antworten	77
b) Einfluß der Adaptation auf die Form der initialen Antworten	79
3. Zusammenfassende Bemerkungen	
<u>Zusammenfassung</u>	81
<u>Literaturverzeichnis</u>	83



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Einleitung

I. Das Einzelblitz-ERG

1. Entwicklung des ERGs und Phasenanalyse

Das erste ERG beim Menschen nach Belichtung leiteten bereits im Jahre 1873 DEWAR und MC KENDRICK ab. Die einzelnen wellenförmigen Komponenten, die sie dabei entdeckten, wurden später von EINTHOVEN u. JOLLY (1908) als a-, b-, c- und d-Wellen bezeichnet. Das Potential, das nach Belichtung des Auges nach kurzer Latenz entsteht, beginnt mit einem negativen Ausschlag (a-Welle), dem eine hohe, positive Erhebung, die b-Welle, folgt. Diese beiden Komponenten entstehen bei Einschaltung des Lichtes und werden deswegen auch als "on-Effekt" bezeichnet. Diesem on-Effekt folgt der "off-Effekt" bei Abbruch der Belichtung mit der zweiten Erhebung der Amplitude, der c-Welle und d-Welle. Danach geht die Kurve zur Ausgangslinie zurück.

Diese Potentiale entstehen nach PIPER (1911) u. GRANIT (1932/33) durch Überlagerung mindestens dreier Teilpotentiale, die sie PI, PII und PIII benannten. GRANIT (1932) bestätigte die Theorie der Teilströme mit Versuchen an narkotisierten Katzen, bei denen isoliert zuerst PI, dann PII und schließlich PIII verschwanden.

Das langsamste der Potentiale ist PI. Es bewirkt im wesentlichen die c-Welle und zeigt sich besonders deutlich bei hellen Lichtblitzen während der Dunkeladaptation (DA). Durch Irispotentiale kann es überlagert werden (DODT (1951); KARPE (1945). PII dagegen bildet die b-Welle.

Oft geht beim helladaptierten Auge der b-Welle eine positive x-Welle voraus. Nach SCHUBERT u. BORNSCHEIN (1952) lassen sich nicht immer beide voneinander trennen. Die x-Welle gilt als photopisches Potential (MOTOKAWA u. MITA,

1942; ADRIAN, 1945). Dies beweist auch das Verhalten bei DA, wo nur die b-Welle zunimmt, die x-Welle dagegen nicht. Wir finden die x-Welle auch nur bei Netzhäuten, die mit Zapfen versehen sind, bei zapfenlosen oder zapfenarmen (Katze, Kaninchen, Meerschweinchen) fehlt sie (ADRIAN, 1946). Im Gegensatz zu PII übt das negative Potential PIII einen erregungshemmenden Einfluß aus. Seine Latenz ist die kürzeste. Es bildet folglich die erste, negative a-Welle. Da es die ganze Belichtungszeit über besteht, ist es auch für die d-Welle verantwortlich (STRAUB, 1960). Sowohl a- als auch d-Welle werden von PIII durch Überlagerung mit PII gebildet. Bei Benutzung kurzer Lichtblitze fallen c- und d-Wellen fort. Es resultiert ein vereinfachtes ERG (KARPE, 1948). Dies vereinfachte, klinische ERG ist die komplexe Antwort der gesamten Netzhaut.

2. Entstehung des ERG

Durch die Versuche von DEWAR u. MC KENDRICK (1873), KÜHNE u. STEINER (1880) ist bewiesen, daß die Potentiale nur in der Retina selbst entstehen können. Die heutige Ansicht geht dahin, daß das ERG im wesentlichen von den Sinneszellen der Retina und den Bipolaren gebildet wird.

Nach RIGGS (1949) bilden die Sinneszellen "eine Batterie, die das ERG auszulösen vermag". GRANIT (1932, 1933) nimmt an, daß PII, das für die Erregung des Optikus verantwortlich sein soll, im Synapsenlager der Retina entsteht. PI und PII sollen sich nach BERNHARD (1940) distal von PII entwickeln. BARTLEY (1933, 1936) vermutet den Ursprung von PII in den bipolaren Zellen. SCHUBERT u. BORNSCHEIN (1952) lieferten ebenfalls wichtige Untersuchungen hierzu. NOELL (1952) lokalisierte mit Hilfe pharmakologischer Versuche durch Zerstörung bestimmter Netzhautschichten PII auf die Membranfunktion des Pigmentepithels, was neuerdings in Frage gestellt ist. DODT u. ECHTE (1961) zeigten durch Rattenversuche, daß PII den Bipolaren und eventuell auch den inneren Gliedern der Rezeptoren, PIII schließlich den Rezeptoren selbst angehört. Die Mikroelektrodentechnik hat die älteren

Versuche und Untersuchungen bewiesen und erweitert, hierauf sei jedoch an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

3. Beeinflussung des ERGs durch Intensität und Adaptation

Die ERG-Potentiale, d.h. ihre Form und Höhe, sind von verschiedenen Faktoren abhängig. In erster Linie sei hier die Intensität des Reizlichtes angeführt. Auch die Anstiegssteilheit und die Wellenlänge des Lichtreizes sind von Bedeutung. Um eine möglichst große ERG-Amplitude zu erhalten, muß die beleuchtete Arealgröße bei fokussierter Reizung entsprechend umfangreich sein (SACHS (1929); CREED u.GRANIT (1933); FRY u.BARTLEY (1955); CRAMTON u.ARMINGTON (1955)). Ebenso beeinflussen Sauerstoffmangelatmung SCHUBERT u. BORNSCHEIN, (1952) seelische Erregung und Schmerzreize (FAURE, CHABOT u.DUTERTRE (1952) das ERG. Ferner wechselt das Aussehen der Ausschläge mit dem Adaptationszustand (KOHLEAUSCH (1925); SACHS (1929); KARPE u.TANSLEY (1948); BEST (1953); BORNSCHEIN (1953)). Auch die vor der eigentlichen DA liegende Hellanpassung spielt eine nicht zu kleine Rolle (STRAUB u.HECK (1955)). Es kommt sehr auf die Belichtungsdauer und deren Häufigkeit an (SACHS (1929) , da, wie wir noch besprechen werden, jeder Lichtreiz die DA unterbricht und stört.

II. Das Flimmer-ERG unter Berücksichtigung der geschichtlichen Entwicklung

1. Reizung mit Flimmerlicht im Gegensatz zum Einzel-ERG

Im Gegensatz zum Einzelreiz-ERG setzt sich das F l i m m e r - E R G aus einer Serie dicht aufeinanderfolgender Lichtblitze zusammen, die zunächst über ein subjektives Flackern zum Flimmerein- druck führen. Bereits die ersten systematischen Untersuchungen ließen den Schluß zu, daß das Flimmer-ERG grundsätzlich aus den gleichen Komponenten bestehe wie das

Binzel-ERG und daß sich die verschiedenen Phasen nur bei steigender Frequenz überdecken. BEST und BOHNEN (1957) sahen im ERG bereits Flimmerwellen, bevor eine subjektive Flimmerwahrnehmung vorhanden war.

Bei ansteigender Anzahl der Lichtreize pro Sekunde tritt schließlich die Verschmelzung der Einzelreize ein. Sie können nicht mehr unterschieden werden, die Unterschiedsschwelle ist überschritten, Oberhalb dieser Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) rufen rasch aufeinanderfolgende Lichtreize die gleiche Empfindung hervor wie ein Dauerreiz entsprechender Energie (TALBOT-PLATEAUSches Gesetz).

Bedeutung für Forschung und Klinik

Die Flimmerelektroretinographie wurde zunächst einmal wegen des Phänomens der Verschmelzung intermittierender Lichtreize im Rahmen der ERG-Untersuchungen interessant. Diente sie doch dazu, das zeitliche Auflösungsvermögen der Netzhaut zu prüfen, es mit Hilfe der FVF zu objektivieren und mit der subjektiven FVF zu vergleichen. Erst später entwickelte sich die Analyse des eigentlichen Flimmer-ERGs, die Aufschluß über die charakteristischen Potentialformen gibt. Man stellte Forschungen an wie beim Einzel-ERG und versuchte ähnliche Abhängigkeiten herauszufinden. Durch die Vielzahl der pro Zeiteinheit registrierten Antworten konnte man auch sehr viel objektivere Angaben machen, so z.B. über Form und Höhe der Potentialbildungen in Bezug auf die vorausgehende Adaptation und die Intensität der Reizlichter. Die dritte veränderbare Größe, die Frequenz, brachte Aufschluß über das zeitliche Reaktionsvermögen der nervösen Elemente. Dies schlägt sich in Form der verschiedenen Potentialformen im Verlauf der Frequenzmodulation nieder. Außerdem kam man mit Hilfe der Flimmerelektroretinographie der Deutung der dem ERG zugrunde liegenden Prozesse näher, so auch in der Reaktionskinetik des ERGs (HORSTEN u. WINKELMAN (1956); BORNSCHEIN (1959); SICKEL (1961) . Erwähnt werden soll auch die dauernd steigende Verwendung des Flimmer-ERGs in der Klinik und der klinischen Diagnostik, es seien hier nur

angeführt die Versuche von ISER u. GOODMAN (1956); GOODMAN u. ISER (1956) an Farben- und Nachtblinden, von DODT u. WADENSTEN (1954) bei primärer Pigmentdegeneration und Farbenblindheit, von DENDEN (1962) bei Deuteranopie und die neueren Arbeiten von ZETTERSTRÖM (1964) und NAGATA (1964).

2. Das Flimmer-ERG zur Objektivierung des zeitlichen Auflösungsvermögens der Retina

a) Anfänge der Flimmerelektroretinographie

Zuerst sollen hier die bisherigen Forschungen und die Entwicklung der Flimmerelektroretinographie dargestellt werden, soweit es im Hinblick auf die später angeführten Untersuchungen von Interesse ist. Auf technische und methodische Einzelheiten wird nicht eingegangen. Man nimmt an, daß das erste Flimmer-ERG bereits im Jahre 1880 von KÜHNE und STEINER beim Frosch registriert wurde. Die intermittierende Beleuchtung erzeugten sie durch Kompression eines Gasschlauches, über den die Lichtquelle in Form eines ARGANDSchen Brenners gespeist wurde. Die schon oben angeführte Bestrebung, die FVF bei Tieren zu bestimmen, führen auf PIPER (1911) und DAY (1915) zurück. SACHS (1929) und COOPER, CREED und GRANIT (1933) registrierten zum erstenmal am Menschen ein Flimmer-ERG. Auch sie untersuchten die FVF und fanden, daß die subjektiv wahrgenommene FVF über der elektroretinographisch erhobenen läge. SACHS behauptete hingegen, beide seien gleich.

b) Feststellung der FVF beim Menschen (subjektive und objektive FVF)

Diese Frage wurde daraufhin von verschiedenen Autoren untersucht. In letzter Zeit hat sich das Gewicht jedoch zu Gunsten der höheren FVF im ERG verschoben. Dies ist wohl zu einem großen Teil darauf zurückzuführen, daß die technische Ausrüstung eine bessere wurde. Erstens ist die Erzeugung hellerer Lichtblitze möglich und zweitens die Registrierung auf Grund der modernen Verstärkertechnik eine genauere. Hier ist zu erwähnen der Resonanzverstärker von HENKES. Neuerlich wird die Auswertung sogar von Computern

übernommen (ARMINGTON u.Mitarb. (1961); JACOBSON, STEPHENS u.SUZUKI (1962). Nähere technische Entwicklung siehe BORNSCHEIN (1964).

DODT (1951, 1954) wies auf eine damals hohe subjektive FVF von 60 bis 70 Reizen pro Sekunde hin und behauptete, daß die elektroretinographische FVF dieser gleiche. Er definierte die FVF als die Frequenz, bei der noch eben gerade jeder Reiz mit einem Ausschlag beantwortet wird. Später registrierte aber HECK (1957) eine FVF von 95 Reizen pro Sekunde und RIGGS, JOHNSON und VIDALE (1962) fanden sogar eine objektive FVF von 90 bis 110 Reizen/sek., wobei sie die subjektive mit 60 bis 68 Hertz angaben. Auch BEST und BOHNEN (1957a) bestätigten, daß bei hoher Flimmerfrequenz schon ein einheitlicher Lichteindruck vorhanden ist, obwohl das ERG den intermittierenden Reizen noch zu folgen vermag.

Daraus ist zu ersehen, daß das periphere Auflösungsvermögen der Retina größer ist als das zentrale. Dies stimmt mit den Beobachtungen von BAYNTON, STURR u.IKEDA (1961) überein. Sie leiten die FVF auf einen Informationsverlust während der Fortleitung der Erregung von der Netzhaut zur Sehrinde zurück. In letzter Zeit haben Untersuchungen von BRINDLEY (1962) mit kombinierter elektrischer und optischer Reizung des menschlichen Auges gezeigt, daß weit über der FVF liegende Frequenzen 120/sec mit dem elektrischen Wechselstrom Schwebungen produzieren, die sich in rhythmischen Veränderungen des Phosphens manifestieren. BRINDLEY schließt hieraus, daß die Verschmelzung weder durch die Rezeptoren noch durch die neuronalen Elemente allein bestimmt wird, sondern daß beide Systeme eine Abschwächung höherer Frequenzen verursachen.

c) Möglichkeiten der fehlerhaften Ablesung der FVF
Diese rhythmischen Schwebungen werden auch elektroretinographisch wahrgenommen und können den Eindruck einer höheren FVF erwecken. BORNSCHEIN (1964) machte darauf aufmerksam, daß jede Erhöhung des Störpegelabstandes (Schwankungen der

Basislinie) gleich "signal to noise ratio" die FVF ebenfalls erhöhen können.

d) Abhängigkeit der FVF

Schaltet man alle diese durch mehr oder weniger große Ungenauigkeiten hervorgerufenen Schwankungen bei der FVF aus, so gelangt man zu den eigentlich ausschlaggebenden Faktoren, die bei der FVF mitsprechen. Dies ist erstens die *Adaptation* und zweitens die *Intensität der Lichtreize*. BAYNTON, STURR u. IKEDA (1961) fanden, daß die Unterschiedsschwelle während der Hellphase des Flimmerlichtes erhöht, während der Dunkelphase erniedrigt ist. Dies deutet an, daß die FVF sowohl vom Adaptationszustand abhängig ist (TRENDELENBURG (1943) als auch von der Intensität, d.h. dem Leuchtdichteunterschied (FERRY-PORTERsche Regel). Es soll das im Folgenden erläutert werden.

3. Flimmer-ERG und Adaptation

a) Der Ursprung in den nervösen Elementen, d.h. den Rezeptoren

Will man nun die Erscheinungsformen des Flimmer-ERGs weiter ergründen und ihr Verhältnis zum Adaptationszustand genauer beleuchten, so muß man bei der Analyse der einzelnen ERG-Komponenten beginnen, die eingangs beschrieben wurden und ihre komplexe Form im Flimmer-ERG betrachten.

ADRIAN stellte im Jahr 1945 grundlegende Untersuchungen im Sinne der Duplizitätstheorie des visuellen Systems über die *skotopischen* und *photopischen* ERG-Komponenten an. Obwohl man die Dualität des menschlichen Rezeptorenfeldes immer noch anerkennt, spricht man jedoch heute nicht mehr von dem strukturellen Stäbchen- oder Zapfen-ERG, sondern entscheidet sich für den *funktionellen* Ausdruck des photopischen und skotopischen ERG. Diese Deutung verdanken wir DODT (1962).

Einteilung des Flimmer-ERGs in E- und I- Typ

DAY (1915) beschrieb, daß bei ansteigender Frequenz der intermittierenden Reize bei Belichtung einer Fischretina

zuerst die c-Welle und dann die d-Welle verschwand und die Fusion auf der Interferenz der negativen a-Welle und des positiven off-Effektes eintrat. Auch GRANIT (1935) fand bei Tierversuchen ähnliche Beobachtungen. Er teilte die Netzhäute in zwei Typen ein: als den von DAY beschriebenen I-Typ und den E-Typ, der mit einer einfachen Folge von b-Wellen antwortet. Der I-Typ weist "negative notches" im Flimmer-ERG auf, weil negative Wellen mit einer Hemmung der Optikusentladungen einhergehen (I = inhibition), wohingegen rasche, positive Wellen den Sehnerven erregen (E = excitation). Die I-Retina vermag im photopischen Bereich weit höheren Flimmerfrequenzen zu folgen als die E-Retina. Weiterhin, und das ist wohl das Wichtigste, ist der Reaktionstyp abhängig von der Stäbchen- bzw. Zapfenbesiedlung der Netzhaut. So antwortet beispielsweise die Katzenretina, die fast ausschließlich Stäbchen enthält, auf Flimmerreize mit sich wiederholenden b-Wellen, während Retinae mit einer überwiegenden Anzahl von Zapfen mit einer Folge positiver und negativer Potentiale, nämlich a- und b-Wellen, antworten. Da die meisten Retinae Stäbchen und Zapfen enthalten, so auch die menschliche, ist die Flimmerform vom Adaptationszustand abhängig (GRANIT 1958) und zeigt ein Interferieren von I- und E-Komponenten.

- b) Abhängigkeit des Flimmer-ERGs vom Adaptationszustand
der Effekt der Helladaptation bei intermittierender
Lichtreizung

Waren noch GRANIT (1947) und DODT und WADENSTEN (1954) der Meinung, daß bei Helladaptation (HA) und DA elektroretinographisch kein Unterschied in der FVF bestände, so gaben sich DODT und HECK (1954) nicht damit zufrieden und suchten wie GRANIT und RIDDELL (1934) weiter nach der Abhängigkeit des Flimmer-ERGs vom Adaptationszustand und fanden, daß die FVF bei DA wesentlich geringer ist als bei HA. Doch ändert sich bei der Flimmerreizung die Adaptation: die intermittierende Lichtreizung hat einen helladaptierenden Effekt (MÜLLER - LIMMROTH; 1959). Deswegen ist es nicht immer einfach, gerade bei intermittierender Reizung, herauszufinden, ob der Adaptation selbst, der Intensität oder der Frequenz das größere Gewicht zukommt.

Um genaue Analysen anzustellen, muß man die beiden anderen Größen, soweit möglich, konstant halten.

α) Versuche über den Adaptationszustand von DODT und HECK

DODT und HECK (1954), die zur adaptiven Beleuchtung die wertvollsten Grundlagen lieferten, machten folgende Beobachtungen an Katzen. Scheint eine Reizung mit Flimmerlicht von 1 Lux bei HA keine Flimmerwelle auszulösen, so zeigt sie bei kurzer DA bereits elektroretinographisch gut wahrnehmbare, skotopische Flimmerwellen. Nach längerer DA werden die Flimmerwellen, sowie auch die initiale b-Welle größer und die FVF steigt an. Eine initiale a-Welle fehlt. An der einzelnen skotopischen Flimmerwelle sind auch d-Wellen, negative off-Effekte beteiligt. Bei Reizung mit hohen Lichtintensitäten, 1600 Lux, also photopischen Bedingungen, sehen wir eine steile, sehr hohe initiale b-Welle gefolgt von kleinen, polyphasischen Flimmerpotentialen, die erst bei höheren Flimmerfrequenzen verschmelzen. Hier gilt die Parallelität zwischen FVF und Amplitudenzunahme nicht. Eine Erhöhung der FVF kann folglich durch eine Amplitudenzunahme zustande kommen.

Bei photopischen Intensitäten (90 Lux) zu Beginn der DA erreichen die Flimmerreize die Zapfenschwelle. Die FVF ist folglich höher als bei stäbchenschwellennahen Lichtstärken. In den ersten 10 min. der DA steigt die FVF an, dann fällt sie wieder auf den Ausgangswert. Somit summieren sich das photopische und skotopische System bei DA, erkennbar durch die immer höher werdende initiale b-Welle und das Auftreten kleiner, teils photopischer Flimmerpotentiale.

Die Zu- und Abnahme der FVF hängt mit der anfänglichen Zapfenadaptation zusammen. Im weiteren Verlauf der DA werden jedoch die Zapfen durch die Stäbchen aktiv gehemmt.

Auch beim Menschen finden wir ähnliche Ergebnisse. Das skotopische Flimmer-ERG beginnt mit einer runden b-Welle, der nach

der initialen Unterdrückungsphase die diphasischen, runden, sinusförmigen Flimmerwellen folgen. Beim photopischen Flimmer-ERG taucht eine tiefe, spitze a-Welle und eine scharfe, positive x-Welle (BORNSCHEIN u. SCHUBERT, 1953) auf, der bei entsprechend hohen Intensitäten kein non flickering part folgt, sondern die polyphasischen photopischen Flimmerwellen aus a- und x-Welle bestehend und einem deutlichen positiven off-Effekt.

β) der non flickering part

Die nach der initialen Antwort auftretende Unterdrückungsphase wird ebenfalls als ein Zeichen zunehmender DA aufgefaßt (DODT u. HECK, 1954). Die selektive Reduktion der nach der initialen a- und b-Welle folgenden Potentiale mit dem späteren Anstieg zu konstanter Größe beim Menschen wurde zuerst von ADRIAN (1945) entdeckt. Er führte diese Erscheinung auf einen maximal großen Ausschlag der aufgeladenen Retina auf den ersten Reiz hin zurück und einem allmählichen Zurückkehren zu einer gleichbleibenden Antwort. Von DODT u. HECK, die den non flickering part als erste genauer zu erklären suchten, wurde auf die oben schon angeführte Beziehung zwischen DA und non flickering part als Ausdruck der Hemmung des Zapfenapparates durch die Stäbchen hingewiesen. Nach GRANIT u. RIDDELL (1934) hängt die FVF mit dem non flickering part zusammen, denn ehe dieser beendet ist, ist die FVF bereits überschritten. Seine Länge hängt außerdem von der Sauerstoffversorgung der Retina ab (DODT u. HECK). GOODMAN u. ISER (1956) erweiterten diese Studien in Bezug auf das skotopische Flimmer-ERG. Die frühe Unterdrückungsphase mag bei niedriger Intensität oder Flimmerfrequenz fehlen, ist aber auslösbar, sobald eine der beiden Komponenten erhöht wird. Bei hohen Intensitäten oder Flimmerfrequenzen sind alle b-Wellenpotentiale erniedrigt. Der non flickering part kann mehrere Sekunden dauern. Auch ARDEN, GRANIT u. PONTE (1960) registrierten eine stärkere Suppression beim Übergang zu photopischen Intensitäten. Diese Befunde lassen

vermuten, daß die Verzögerung vor Eintritt des steady state, für die ADRIAN (1945) die große initiale Antwort anschuldigt, ebenso durch die folgenden Lichtreize beeinflusst wird, die während der Periode der Erholung auftreten und der Erreichung des steady state vorausgehen (GOODMAN u. ISER (1956) . Auch unter Verwendung von Doppelreizen wurde das Phänomen weiter erhellt (WAGMAN u. Mitarb. 1954; MAHNEKE, 1957; BURIAN u. SPIVEY, 1959; SVERAK u. PREGRIIN, 1960; FRANCOIS u. DE ROUCK, 1962) : bei HA ist die Reduktion der zweiten Antwort geringer als bei DA; denn der Erholungsablauf ist rascher.

4. Flimmer-ERG und Reizintensität

Die verschiedenen Formen des Flimmer-ERG, die in eine skotopische, eine gemischte (GOODMAN u. ISER, 1956) und eine photopische Form unterteilt werden, sind im wesentlichen hervorgerufen erstens durch die Adaptation, wie ausführlich unter 3b angeführt, zweitens durch die Intensität und drittens durch die Frequenz der intermittierenden Lichtreizung. Wir wollen uns nun dem zweiten, der Intensität, zuwenden

a) das skotopische Flimmer-ERG

Bei konstanter Frequenz um oder unter 10 Hertz untersuchten DODT und WADENSTEN (1954) die Auswirkungen der Intensität. Bei 0,2 bis 4 Lux haben die Flimmerwellen ein skotopisches Aussehen. Es sind kleine runde, positive b-Wellen, die eine große Latenz und sanft fallende Potentiale haben, a-Welle und off-Effekt fehlen. Zwischen 5 - 20 Lux zeigen die retinalen Antworten ein komplexeres Verhalten. Sie gehen von der skotopischen in die photopische Form über. Auch die FVF steigt als Funktion der Lichtreizintensität nicht kontinuierlich an, sondern weist einen Knick auf (DODT u. WADENSTEN, 1954). Die im untersten Teil vor dem Knick nachweisbaren langsam verlaufenden, runden skotopischen Wellen verschmelzen bei 11 Reizen/sec (0,2 Lux) und 20 Reizen/sec. (4 Lux). Das mit höheren Reizintensitäten aus-

gelöste Flimmer-ERG hat allein auch schon deswegen photopischen Charakter, weil die Reizbelichtung nebenbei eine HA auslöst und die skotopische, langsame Komponente unterdrückt.

b) das gemischte Flimmer-ERG

Das gemischte Flimmer-ERG finden wir am Übergang von skotopischen und photopischen Intensitäten. Es nimmt eine Zwischenstellung ein und besteht aus schnellen und langsamen Komponenten. Die photopischen Einflüsse machen sich zuerst als kleine Unregelmäßigkeiten auf den Gipfelpunkten der skotopischen Wellen bemerkbar, sie reiten auf ihnen (GOODMAN u.ISER, 1956).

c) das photopische Flimmer-ERG

Oberhalb von 20 Lux haben die photopischen Wellen von kurzer Latenz das Feld gewonnen und die langsamen b-Wellen ganz unterdrückt. Wir sehen nun die tiefe, negative a-Welle und die steile, spitze positive x-Welle am Anfang und anschließend die polyphasischen Flimmerwellen.

Grundlegende Beiträge über das photopische Flimmer-ERG lieferten vor allem BORNSCHEIN u.SCHUBERT (1953). Sie beschrieben das photopische Flimmer-ERG und seinen außergewöhnlich hohen, positiven off-Effekt. Von HECK (1957 a u.b); BEST und BOHNEN (1957a) und HOWART (1961) wurde darauf hingewiesen, daß dieser mindestens aus zwei Schwankungen besteht. Dem ebenfalls positiven on-Effekt sind noch kleinere Schwankungen überlagert, als "humps" oder "wavelets" bezeichnet (CORB u.MORTON, 1952; BORNSCHEIN u.GOODMAN, 1957; GOODMAN u.ISER, 1956; YONEMURA u.Mitarb., 1962).

5. Flimmer-ERG und Reizfrequenz

Schon DAY fiel auf, daß die Frequenz der Flimmerreize einen sehr beträchtlichen Einfluß auf die Form der Flimmerwellen hat. DODT (1951) stellt in seiner ersten Untersuchung über das photopische Flimmer-ERG des Menschen fest, daß bei intensiven Reizen über 20 Hertz die b-Wellen

aus dem ERG verschwinden und das Bild von der negativen a-Welle und dem off-Effekt beherrscht wird. Weitere Studien von BORNSCHEIN u. SCHUBERT (1953) ergänzten diese Befunde.

Entspricht das bei niedrigen Frequenzen ausgelöste Flimmer-ERG noch weitgehend dem ERG bei Einzelblitzen und HA, so erscheint mit zunehmender Reizfrequenz ein deutlicher, positiver off-Effekt, der sich infolge der fortschreitenden Verkürzung des Reizintervalls schließlich mit der ebenfalls positiven x-Welle vereinigt (BORNSCHEIN u. SCHUBERT, 1953). Bei 30 Hertz wirkt die hinter jeder x-Welle durch den nächsten Reiz ausgelöste, unmittelbar anschließende, negative a-Welle als gegenläufige Schwankung im Sinne einer Vergrößerung der ERG-Amplitude. Bei weiterer Erhöhung der Reizfrequenz nimmt die Amplitude der Flimmerwellen wieder ab. Daß dies durch eine Änderung der Phasenlage zwischen positiven und negativen Komponenten verursacht wird, veranschaulicht die Tatsache, daß bei Ende der Flimmerlichtreizung die letzte positive Schwankung größer erscheint als die vorherigen Wellen, da hier bei dieser hohen Frequenz nun die amplitudenreduzierende Wirkung der nächst fälligen a-Welle ausbleibt (DAY (1915), BORNSCHEIN u. SCHUBERT (1953), BEST u. BOHNEN (1957a)).

BEST und BOHNEN und HECK machten auf die Bedeutung des positiven off-Effektes aufmerksam, der sich unter photopischen Bedingungen und bei Verkürzung der Reizdauer vergrößert und zum positiven on-Effekt addiert. Auch HOWART (1961) bestätigte diese Ergebnisse.

a) Flimmerwellenamplitude und Phasenanalyse

In besonders eindrucksvoller Weise schildert HECK das Flimmer-ERG in Bezug auf Frequenz und Phasenanalyse. Er bezeichnet das Ansteigen der Amplitude der Potentiale als ein Anzeichen der algebraischen Interferenz der einzelnen Phasen. Eine Objektivierung erfahren seine Ergebnisse durch Ausmessung der Flimmerwellenamplitude bei fünf augengesunden Personen unter photopischen Bedingungen. Die Flimmerwellen zeigen ein Maximum an Größe bei 30-40 Reizen/sec., während ein Minimum bei 10-15 Reizen/sec. auftritt. Die Potentiale

verschmelzen bei 75-80 Reizen/sec.(250 Lux). Werden stärkere Lichtintensitäten benutzt, so liegt die FVF bei 95 Reizen/sec.. Ähnliche Werte betreffs der Amplitudenhöhe wurden von BORNSCHEIN u.LAHODA (1960) ermittelt mit einem Maximum bei 40 Reizen/sec..

b) Besonderheiten des off-Effektes

Das Auftreten des off-Effektes, der diese hohe Amplitude bewirkt, kommt aber noch in anderer Form zum Ausdruck. Bei Flimmerreizung mit rotem Licht zeigten BEST und BOHNEN (1957a), daß bei einer Frequenz von 40-60 Reizen/sec. jedes zweite Flimmerpotential höher ist, als das dazwischenliegende (zuerst erkannt von GRANIT und THERMAN, 1935, dann auch BARTLEY, 1937). Die Deutung ist folgende (BEST und BOHNEN, 1957a u.b.): in den hohen, positiven b-Wellen, die bei größeren Intensitäten auftreten, ist ein positiver off-Effekt enthalten. Bei schwächeren Lichtreizen ist er kaum nachweisbar. Auf Grund einer Latenzverlängerung im relativen Refraktärstadium tritt jeder zweite off-Effekt verzögert auf und wird darum stärker von der a-Welle des nachfolgenden Reizes beschnitten. Das menschliche Flimmer-ERG flimmert also bei hohen Intensitäten mit der Summe von on- und off-Effekten (BEST und BOHNEN, 1957a).

c) das Verhalten der Initialwellen

Eine weitere erwähnenswerte Besonderheit des Flimmer-ERGs ist das Verhalten der initialen Antwort in Korrelation zur Frequenzänderung. GOODMAN und ISER (1956) haben sich hierzu geäußert. Es wäre zu erwarten, daß die initiale, positive Zacke auch in ihrer Größe von der nachfolgenden a-Welle beschnitten würde, ähnlich wie die Flimmerwellen bei Frequenzen um 50-60 Hertz. Es stellt sich aber heraus, daß die initiale positive Welle nicht sehr durch die nachrückenden Flimmerreize beeinträchtigt wird. Sie entspricht vielmehr einer Einzelblitzantwort und sucht ihre Integrität zu bewahren, die Faktoren, die die folgenden Flimmerwellen in ihrer Größe erheblich beschneiden, können ihr nichts anhaben.

Lediglich im gemischten Flimmer-ERG wird dieser Einzelschritzausschlag von der der Reizfrequenz entsprechenden kleinen x-Wellen überlagert, die sich der initialen, positiven Antwort aufpflanzen (GOODMAN u. ISER, 1956).

III. Fragestellung

Die beschriebenen Ergebnisse und Forschungen über das Flimmer-ERG lassen noch viele Fragen offen. Mit den im folgenden dargestellten Untersuchungen möchten wir einige Fragen beleuchten und zu ihrer Lösung beitragen.

Die Abhängigkeit des Flimmer-ERGs des Menschen von der Adaptation allein ist eine noch nicht erschöpfend behandelte Erscheinung. Zwar sind von DODT und HECK (1954) an Katzen grundlegende Forschungen angestellt worden, ebenso hat GRANIT (1958) darauf hingewiesen, daß die Flimmerform vom Adaptationszustand abhängig ist, doch wurde von BORN-SCHIEIN und SCHUBERT (1953) behauptet, daß die DA und damit doch auch die Unterschiede im wesentlichen nur für den ersten Reiz gelten. Auch DODT und WADENSTEN (1954) sahen bei photopischen Intensitäten nach vorausgegangener DA oder HA Unterschiede nur in der ersten Flimmerreaktion wegen des HA-Effektes der Flimmerreizung (MÜLLER-LIMMROTH, 1959). Daß dem aber nicht so ist, sollen die hier angeführten Versuche beweisen. Selbst kurze DA von einigen Sekunden soll einen Einfluß vor allem auf die Höhe und Form der Flimmer-ERG-Potentiale haben, und zwar nicht nur in der ersten Flimmerreaktion, sondern über die ganze Reihe der hintereinander ausgeführten Reizungen mit verschiedenen Frequenzen und Intensitäten hin.

Mit objektiven Methoden, d.h. mit Ausmessung der Netzhautpotentiale soll hier der Unterschied zwischen HA und kürzester DA herausgestellt werden. Unsere Aufgabe soll sein, auf Grund von Reizung mit verschiedenen Intensitäten bei

ansteigender Frequenz die Änderung der Flimmerwellenamplitude zu messen, ähnlich den Versuchen, die bereits von HECK (1957a) an einem geringen Personenmaterial nur unter photopischen Reizintensitäten ausgeführt wurden, ebenso von BORNSCHEIN und LAHODA (1960). Wir untersuchen aber außerdem bei intermittierender Lichtreizung mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlängen. Auch wird das von GOODMAN und ISER (1956) erwähnte Verhalten der initialen Antwort in Bezug auf die Frequenzabhängigkeit mit Hilfe von Ausmessungen der initialen a- und b-(x)-Welle überprüft. Alle diese Messungen werden bei DA und HA, verschiedenen Intensitäten und Farben gleichermaßen ausgeführt und auf diese Weise gegenübergestellt.

Methodik

I. Apparatur

1. Haftschale

Bei den Versuchen wird eine Haftschale nach PAPST u. ECHTE benutzt, die mit einer 100 dptr.-Sammellinse zur bestmöglichen Ausleuchtung der Retina versehen ist. Eine ringförmige, indifferente und eine punktförmige, differente Silberelektrode leiten die Potentiale von der Retina ab. Außerdem befindet sich an der Haftschale eine Ansaugvorrichtung (s. Abb. 1).

2. Vorverstärkung

Die Vorverstärkung wird mit dem Tektronix "Type 122-Low-Level-Preamplifier" durchgeführt, der mit dem Netzgerät Type 125 "Power Supply for Type 122 Preamplifier" betrieben wird. Der Eingangswiderstand beträgt bei Differentialschaltung 20 Megohm, parallel dazu 50 Picofarad. Es handelt sich um einen Differentialvorverstärker mit drei Verstärkerstufen, die RC gekoppelt sind und eine Verstärkung von 100 oder 1000 mal ermöglichen. Der Vorverstärker hat eine Bandbreite von 0,2 Hertz bis 40 Kilohertz. Bei den Versuchen wird eine Bandbreite von 0,2 Hertz bis 10 Kilohertz benutzt.

3. Hauptverstärkung

Die Potentiale werden auf den Eingang des Hauptverstärkers "Typ 3 A 72 Dual Trace Amplifier" geleitet. Es ist ein Elektronenschalter, der einen Stahl des Typ 565 Oscilloscope auf zwei Strahlen schaltet. Auf einen Kanal wird die Reizmarkierung von einer Gasphotozelle gegeben, auf den anderen kommt das ERG. Bei der RC-Schaltung wird durch einen Kondensator die untere Frequenz auf zwei Hertz heraufgesetzt. Insgesamt besteht dann eine Bandbreite von 2 Hertz bis 10 Kilohertz. Die Potentiale steuern die Platten der Kathodenstrahl-oscillographenröhre des Tektronix, Type 565, aus. Eine zweite gleiche Einheit, die den zweiten Kanal des 545 aussteuert, kann für das zweite Auge benutzt werden.

4. Registrierung

Die Registrierung vom Bildschirm der Oscillographenröhre erfolgt bei abgestelltem Kipp mit einer Robot-Kamera. Die Transportgeschwindigkeit des kontinuierlich durchgezogenen Filmes wurde hier zwischen 4 cm/sec. und 7 cm/sec. geregelt.

5. Lichtreizung

Zur Lichtreizung dient das Lichtreizgerät nach HALSTRUP für augenphysiologische Untersuchungen. Das Gerät besteht aus einer schweren, optischen Bank, auf der ein lichtdichtes Gehäuse montiert ist, in dem sich eine Xenonhochdrucklampe XBO 1001 befindet. Die XBO 1001 hat 900 W, einen Nutzregelbereich von 30-50 A und wird mit 36 A betrieben. Im Ausgang des Gehäuses ist für jeden Kanal ein Kondensator



Abb. 1

Bei den Versuchen benutzte Haftschale nach PAPST und ECHTE. Der mittlere Anschluß gehört zu der Ansaugvorrichtung, die beiden äußeren enthalten die Ableitungskabel der Elektroden

angebracht und davor eine Scheibe mit mehreren Pupillen.

Auf der optischen Bank ist zuerst ein Motor zur Betreibung der Sektorenscheiben montiert, die zur Flimmerlichtreizung dienen. Das Gerät umfaßt einen Frequenzbereich von 5-90 Reizen/sec. und ist stufenlos regelbar. Das Hell-Dunkel-verhältnis beträgt 1:1.

Daran schließt sich ein Photoverschluß Cassar 1:3,5 an mit einer Brennweite von 50 mm und einem Verschluß für Dauer- und Momentbelichtung. Darauf folgt ein Wärmefilter für langwellige Strahlen. Weiter befindet sich im Lichtstrahl eine schräggestellte Glasplatte, die Licht auf eine Gasphotozelle zur Reizmarkierung wirft. Diese ist mit den entsprechenden Eingängen des Kathodenstrahlloscillographen verbunden. Dann folgt eine Kassette mit Graufiltern von BAUSCH und LOMB, New York, ferner ein Filterrad mit Doppelinterferenzfiltern von SCHOTT und Gen. verschiedener Wellenlängen von 468 bis 640 mμ. Diese monochromatischen Lichtfilter sind auf physikalische Energiegleichheit gebracht. Zusätzliche Bündelung des Lichtes wird mit einer +2 dptr.-Linse erreicht. Das Licht wird mit einem Oberflächen Spiegel auf das Auge der Versuchsperson gelenkt.

6. Untersuchungsplatz

Der eigentliche Untersuchungsplatz wird von einem Faraday-käfig eingeschlossen, um etwaige elektrische Störungen zu vermeiden. Die Versuchsperson liegt auf einem Ruhebett, dessen Kopfteil verstellbar ist. Zur HA blickt die Versuchsperson auf die ungefähr 1,80 m entfernte, weiße Wand, die durch ein weißes Tuch dargestellt wird. Diese Wand wird zum Zwecke der HA mit einer 500 W Nitraphot-Osram-Lampe beleuchtet. Über dem Auge der Versuchsperson befindet sich ein Spiegel, der die Lichtreize auf das Auge wirft.

II. Ausmessung

Die Amplituden der einzelnen ERG-Wellen werden gemessen und entsprechend der Verstärkung in Mikrovolt (μV) umgerechnet.

Zur Ausmessung gelangten einmal die initiale a- und die x(b)-Welle, zum anderen die darauffolgenden Flimmerwellen. Die initiale a-Welle wird von der isoelektrischen Linie nach unten gemessen, die x(b)-Welle vom unteren Pol der a-Welle bis zur Spitze der positiven Erhebung (STRAUB, 1960). Die Flimmerwellen reichen jeweils vom Fußpunkt der a-Welle bis zum nachfolgenden höchsten Anstieg der Amplitude. Die Größe der Flimmerwellen ergibt sich aus dem Mittelwert der registrierten Ausschläge unter Auslassung des non flickering parts. Bei alternierendem Flimmern (BEST u. BOHNEN, 1957a u. b) wird aus den größeren und den kleineren Potentialen jeweils der Mittelwert ermittelt.

III. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt nach den in den "Documenta Geigy" (1957) angegebenen Formeln:

Mittelwert $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum S(x)$ $N = \text{Anzahl}$

Streuung $s^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum S(x^2) - \bar{x} \sum S(x) \right]$ $\bar{x} = \text{Mittelwert}$
 $S = \text{Summe}$

Standardabweichung $s = \sqrt{s^2}$ $x = \text{Einzel-Meßwert}$

Normalbereich $\bar{x} = \pm 2 s$ $s = \text{Standardabweichung}$

Prüfung der Signifikanz zweier Mittelwerte:

Steuerung der Mittelwerte einer Stichprobe

$$s_x^2 = \frac{1}{N} s^2$$

Standardabweichung der Mittelwertdifferenz

$$s_D = \sqrt{\frac{s_x^2}{N} + \frac{s_{x'}^2}{N'}}$$

Abweichung der beiden Mittelwerte voneinander

$$c = \frac{\bar{x} - \bar{x}'}{s_D}$$

p (Probabilitas) wird durch c aus der in der Documenta Geigy angegebenen Tabelle abgelesen.

IV. Patientengut

Die Versuchspersonen bestanden aus 58 augengesunden, vorwiegend jugendlichen Personen. Ihr Alter lag zwischen 12 und 65 Jahren. Daraus errechnete sich ein Altersdurchschnitt von 27 Jahren. Untersucht wurde jeweils ein Auge einer Versuchsperson. Hierbei wurden in einigen Fällen Myopien und Hyperopien von ± 2 dptr. toleriert.

V. Durchführung der Versuche

Die Versuche fanden im Zeitraum vom 20. Juni bis 18. Dezember 1965 statt und wurden entweder zwischen 10 und 13 Uhr oder 16 bis 18 Uhr ausgeführt.

Die Pupille wurde mit "Mydriaticum (Roche)" erweitert, die Cornea mit "Novesin" anaesthetisiert.

Die Experimente wurden bei der einen Hälfte der Versuchspersonen bei DA, bei der anderen bei HA durchgeführt.

1. Adaptation

a) Dunkeladaptation

Der eigentlichen DA geht eine Voradaptation voraus, damit alle Versuchspersonen die gleichen Vorbedingungen in Bezug auf Hellanpassung haben. Sie besteht in einer zehnminütigen HA, die durch Beleuchtung des weißen Tuches am Fußende des Ruhebettes erzeugt wird und etwa einer subjektiven Helligkeit von 120 Lux entspricht, über dem Auge der Versuchsperson gemessen. Nach fünf Minuten völliger DA und anschließendem Einsetzen der Haftschale beginnt die Flimmerreizung bei Dunkelheit.

b) Helladaptation

Die Versuchsperson unterzieht sich nur der oben angeführten Voradaptation.

Nach Einsetzen der Haftschale und Ausschaltung der Blendung wird bei einer Helligkeit von etwa 100 Lux mit der Flimmerreizung begonnen.

2. Flimmerlichtreizung

a) verschiedene Intensitäten

Die Flimmerlichtreizung wird bei verschiedenen Helligkeitsstufen und bei ansteigender Frequenz bis zur FVF durchgeführt. Die wechselnden Lichtintensitäten, die mit den Graufiltern erzeugt werden, haben die logarithmische Einteilung von:

log -3,0	und entsprechen ungefähr	0,3 Lux
log -1,8		5,4 "
log -1,2		20 "
log -0,9		72 "
log -0,3		200 "
log 0		420 "

Gereizt wird mit allen angegebenen Intensitäten jeweils bei

Dunkeladaptation mit:

10 Reizen/sec.

22 "

30 "

40 "

50 "

60 "

70 "

Helladaptation mit:

10 Reizen/sec.

22 "

30 "

42 "

50 "

60 "

70 "

80 "

90 "

b) verschiedene Wellenlängen

Außerdem wird anschließend ein Flimmer-ERG mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlängen abgenommen, ebenfalls bei ansteigender Frequenz bis zur Verschmelzung. Die Wellenlängen betragen:

486	mμ
504	"
540	"
559	"
584	"
614	"
640	"

Die Reizung erfolgt aber in umgekehrter Reihenfolge, fängt also mit 640 μ an und hört mit 468 μ auf. Die Frequenzen sind bei

Dunkeladaptation

10	Reize/sec.
22	"
30	"
42	"
50	"

Helladaptation

10	Reize/sec.
22	"
30	"
42	+
50	"
60	"

Die einzelnen Reizungen bei verschiedenen Intensitäten und Wellenlängen erfolgen gleichermaßen kurz hintereinander im Abstand von jeweils ca. 5 sec. und dauern etwa 3-4 sec.. Beim Auswechseln der Sektorenscheiben ist das Zeitintervall natürlich etwas länger.

+) Wegen der Gefahr einer Erosio Corneae wurde die Versuchsdauer durch Auslassung der Frequenz von 42 Reizen/sec. bei DA (Intensitäten) und HA (Farben) beschränkt.

Ergebnisse

I. Ergebnisse bei DA und Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten

1. Flimmerwellen

a) Amplitude der Flimmerwellen

Einen guten Überblick über das Verhalten der Flimmerwellen bei ansteigenden Intensitäten und zunehmender Frequenz nach einer DA von 5 Minuten gewinnen wir aus den Kurven der Abb. 2, die aus den Mittelwerten der einzelnen Flimmerwellenamplituden ermittelt wurden.

α) Abhängigkeit von der Intensität

Zu Beginn der verschiedenen Intensitätskurven bei 10 Reizen/sec. (Abb. 2) sieht man, daß die der schwächsten Intensität von $\log -3,0$ den kleinsten Wert von $62 \mu V$ aufweist. Bei $79 \mu V$ liegt dann die Kurve von $\log -1,8$. Die stärkeren Intensitäten folgen mit entsprechend höheren Amplituden, die jedoch näher zusammenliegen, obgleich sie Unterschiede von 130 und 220 Lux aufweisen. Das Verhältnis der Abstände der Intensitätskurven bleibt auch bei den höheren Frequenzen annähernd konstant. Diese Abstände stehen wie die Grau- oder Neutralfilter in einem logarithmischen Verhältnis zueinander. Sehr deutlich sieht man auf der Abb. 2 das Ansteigen der Flimmerwellenamplitude bei zunehmender Frequenz.

β) Abhängigkeit von der Frequenz

Bei der Frequenz von 22 Reizen/sec. fällt die Amplitude der Intensität $\log -3,0$ rapide ab, ebenso wie $\log -1,8$ und $\log -1,2$. Bei den beiden letzteren ist die Amplitudenabnahme jedoch nicht so stark wie bei der skotopischen Intensität $\log -3,0$. Bei $\log -0,9$ bleibt die Größe der Flimmerwellen bei 10 und 22 Reizen/sec. gleich, dann gewinnen die Wellen plötzlich an Größe, nämlich bei $\log -0,3$ und $\log 0$. Das Maximum erreichen sie jedoch erst bei 30 Hertz mit $158 \mu V$ ($\log 0$). Die Intensität $\log -3,0$ bildet hier eine Ausnahme. Sie behält ihre Höhe von $13 \mu V$ bei, doch alle anderen Kurven steigen an, diejenigen mit den niederen Intensitäten nicht so stark wie

die mit den höheren. Je größer also die Intensität, desto steiler der Anstieg bei der Frequenz von 30 Hertz. Es fällt weiterhin auf, daß die Werte bei $\log -0,3$ und $\log 0$ auf nahezu gleicher Höhe liegen. Helligkeitssteigerung in diesem Bereich vermag die Amplitude folglich nicht wesentlich zu vergrößern, wie wir schon erwähnten.

Bei 50 Hertz macht sich ein Abfall der Flimmerwellengröße bemerkbar, der sich weiter bis zur Verschmelzung der Flimmerwellenausschläge fortsetzt. Entsprechend der Intensität ist auch die FVF verschieden. Während die hellsten Flimmerreize erst bei 77 Reizen/sec. verschmelzen, geschieht dies bei den anderen Intensitäten schon wesentlich früher. $\log -3,0$ verschmilzt wahrscheinlich schon bei 40 Hertz, wir haben bei dieser Frequenz jedoch keine Aufnahmen mehr gemacht.

b) Form und Aussehen der Flimmerwellen

Über die Flimmerwellenamplitude, die offenbar von der Intensität und der Frequenz unterhalten wird und über das Aussehen der Flimmerwellen, geben die abgebildeten Flimmer-ERG Aufschluß (Abb. 3).

Beim Beginn der Flimmerreizung nach 5 min. DA stellen wir bei der Intensität $\log -3,0$ ein rein skotopisches Verhalten fest (Abb. 3A). Das ERG beginnt mit einer runden, skotopischen b-Welle, der oft eine kleine, nur angedeutete a-Welle vorausgeht. Dem hohen, positiven Ausschlag der initialen b-Welle folgt eine negative Schwankung, die sich in einem kurzen, 200-300 msec. dauernden non flickering part fortsetzt (s. auch Abb. 6). Die sinusförmigen, skotopischen Flimmerwellen sind nach der initialen b-Welle auch manchmal nur verkleinert und nehmen dann schnell eine konstante Größe an. Obwohl alle Versuchspersonen der Gruppe die gleiche Voradaptation hatten, sind die Flimmerwellentäler bei einigen, wenigen Kurven schärfer, d.h. spitzer und zeigen so das Auftreten eines negativen Potentials, der a-Welle, die auch schon vorher beschrieben, bei der initialen b-Welle auftritt,

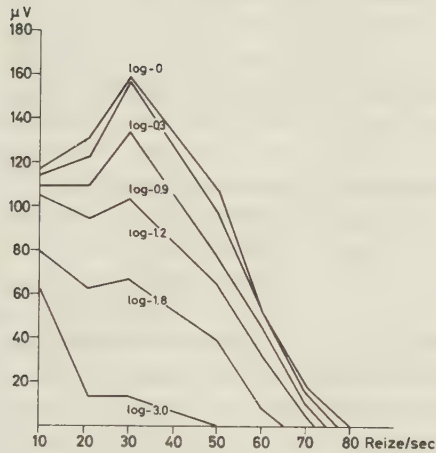


Abb. 2

Amplitude der Flimmerwellen, angegeben in μV in Abhängigkeit zur Reizfrequenz bei DA und Flimmerreizung mit verschiedenen Lichtintensitäten. Die Flimmerreizung beginnt bei einer Frequenz von 10 Reizen/sec. und endet bei der FVF. Die Kurven sind jeweils aus den Mittelwerten bei 25 augengesunden Versuchspersonen ermittelt.

mithin eine photopische Tendenz vertritt. Bei der nächsten Intensität $\log -1,8$ ist kein non flickering part mehr vorhanden. Die Flimmerwellen werden bereits polyphasisch und zeigen ein photopisches Aussehen, so auch bei $\log -1,2$ und $\log -0,9$. Die beiden letzteren Intensitäten unterscheiden sich nur durch ihre höhere Flimmerwellenamplitude, nicht aber durch die Form der Flimmerwellen. Ab $\log -0,9$ treten oft kleine positive off-Effekte nach dem spitzen, positiven x-Gipfel der Flimmerwellen auf, die sich bei den Intensitäten $\log -0,3$ und $\log 0$ noch deutlicher finden. Bei diesen beiden starken Intensitäten fällt die Form der Flimmerwellen auf: Sie bestehen aus sehr tiefen a-Wellen, denen kleine durch oscillatory potentials abgestumpfte x-Wellen folgen, sowie ein kleiner, positiver off-Effekt. Die x-Wellen scheinen durch die hohe Intensität beschnitten, es resultiert ein negativer Flimmertyp mit Überwiegen der a-Welle. Deswegen vermag auch die Flimmerwellenamplitude bei diesen Frequenzen nicht mehr wesentlich anzusteigen, zuweilen sinkt sie sogar ab. Die Aufnahmen der Intensität $\log 0$ sind auf Grund des starken Lichtes und dieser Frequenz, die als besonders hell empfunden wird (BRÜCKE-BARTLEY-Effekt) wegen der reflektorischen Augenbewegungen und Lidschläge meist verwackelt.

Da die Lichtblitze bei ansteigender Frequenz dichter aufeinander folgen, rücken auch die einzelnen Flimmerphasen mehr zusammen und überlagern sich (Abb. 3B). Das polyphasische Aussehen bei 10 Reizen/sec. wandelt sich in ein diphasisches. On- und off-Effekt nähern sich zunehmend und summieren sich bei 22 Hertz zu einer spitzen, hohen Flimmerwelle, deren Anstieg etwas steiler ist als der verzögerte Abfall. Besonders bei den gemischten Flimmer-ERG bei $\log -3,0$ und am ausgeprägtesten bei $\log -1,8$ ist der Anstieg gegenüber dem Abfall so steil, daß die Flimmerwellen nach links umzukippen scheinen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der scharfen x-Welle wahrscheinlich ein skotopischer Restgipfel folgt. Auch die Abnahme der Amplitude der niedrigen Frequenzen (Abb. 2) von 10 zu 22 Reizen/sec. ist so

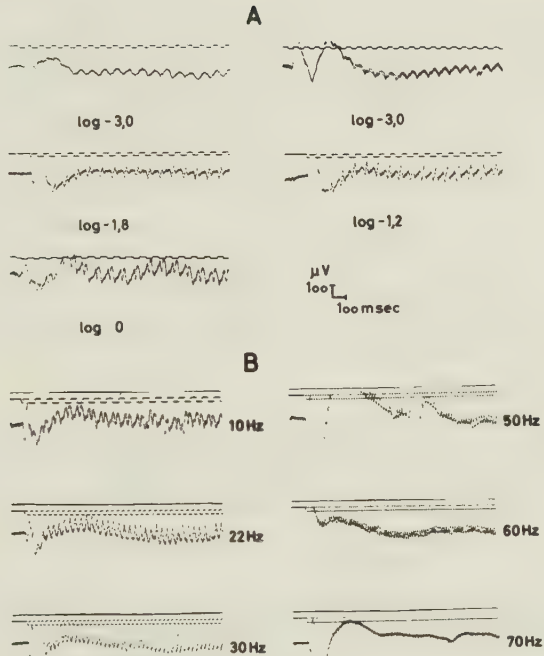


Abb. 3

Flimmerwellen bei DA und Flimmerreizung mit verschiedenen Intensitäten und Frequenzen.

Abb. A : Flimmerwellen bei der Frequenz von 10 Reizen/sec. und verschiedenen Intensitäten.

Abb. B : Flimmerwellen bei Reizung mit der Intensität log-0,3 und ansteigender Reizfrequenz bis zur FVF bei 70 Hertz.

zu erklären. Diese Intensitäten besitzen bei der Frequenz noch keinen deutlichen, positiven off-Effekt, der im Stande wäre, die Amplitude zu vergrößern wie bei den stärkeren Intensitäten. Den Flimmerwellen der rein photopischen Intensitäten sitzt in ihrem absteigenden Schenkel ein sehr viel deutlicheres kleines Nachpotential auf, das mit den gelegentlichen oscillatory potentials im aufsteigenden Teil nicht zu vergleichen ist. Bei 30 Reizen/sec. finden sich ebenfalls kleine oscillatory potentials in den unteren Teilen der Wellen. Möglicherweise handelt es sich hier um Artefakte. Die deutliche Zunahme, d.h. das Maximum der Flimmerwellen bei 30 Hertz ist nicht zu übersehen und ist auf die nun ideale Superposition von on- und off-Effekt zurückzuführen. Bei 50 und 60 Reizen/sec. fällt die Amplitude langsam ab, um bei 70 Hertz in der Basislinie unterzutauchen.

c) Statistik

Die Mittelwerte ($\bar{x}$) der Flimmerwellen bei DA und ihre Standardabweichung (s) als Kriterium der Wahrscheinlichkeit des Mittelwertes sind aus der Tabelle zu ersehen.

Tabelle 1

Hertz	-0,3	-1,8	-1,2	-0,9	-0,3	o log rel.Int.
10	62 $\pm$ 18	79 $\pm$ 24	104 $\pm$ 28	109 $\pm$ 27	114 $\pm$ 27	117 $\pm$ 30
22	13 $\pm$ 14	62 $\pm$ 16	94 $\pm$ 24	109 $\pm$ 30	123 $\pm$ 34	130 $\pm$ 43
30	13 $\pm$ 15	66 $\pm$ 17	103 $\pm$ 29	134 $\pm$ 39	157 $\pm$ 41	158 $\pm$ 42
50	o	39 $\pm$ 13	65 $\pm$ 14	77 $\pm$ 17	97 $\pm$ 21	107 $\pm$ 24
60	o	8 $\pm$ 15	33 $\pm$ 18	45 $\pm$ 17	53 $\pm$ 18	52 $\pm$ 15
70	o	o	4 $\pm$ 9	10 $\pm$ 12	16 $\pm$ 15	18 $\pm$ 13

In dieser Tabelle sind die jeweiligen Mittelwerte $\bar{x}$ Standardabweichung der Flimmerwellen bei DA in μV angegeben.

2. Initiale a-Wellen

a) Amplitude der initialen a-Wellen

Die initialen a-Wellen haben ungefähr die gleiche Amplitude wie die besprochenen Flimmerwellen, nämlich von 0 bis 174 μV (Abb. 4).

a) Abhängigkeit von der Intensität

Die Abb.4 zeigt strenge Abhängigkeit der initialen a-Wellen zur Intensität. Die kleinsten Ausschläge werden von den schwächsten Intensitäten geliefert, die größten von den stärkeren. Dabei fällt auf, daß die beiden höchsten Intensitäten $\log -0,3$ und $\log 0$ ungefähr in gleicher Höhe verlaufen. Daß die a-Wellen bei voller Lichtstärke anfangs bei 10 und 22 Reizen/sec. unter der Kurve von $\log -0,3$ liegen, läßt sich mit der Größe der Flimmerwellen bei 10 Hertz vergleichen, die, wie wir erwähnten, negativ sind und aus tiefen a-Wellen bestehen und zuweilen kleiner sind als diejenigen bei $\log -0,3$.

β) Abhängigkeit von der Frequenz

Die Abhängigkeit von der Frequenz zeigt sich folgendermaßen: die größte Amplitude haben alle a-Wellen bei 10 Reizen/sec., hiernach fallen die Intensitätskurven zu 22 Hertz hin stark ab und darauf etwas flacher zu 30 und 50 Hertz. Einzelne Kurven $\log -1,2$, $0,9$ und $\log 0$ steigen bei 60 Hertz etwas an, um bei 70 wieder das gleiche Niveau zu erreichen. Dies scheint im übrigen überhaupt das Ausschlaggebendste nach dem anfänglichen, steilen Abfall zu sein, denn die Kurven pendeln bei 30, 50, 60 und 70 Reizen/sec. um einen, ihrer Intensität entsprechenden, festen Wert geringfügig hin und her. Die Frequenz hat in Bezug auf die Amplitude in diesem Bereich keinen wesentlichen Einfluß. Die Einzelblitzantwort ist hier dominierend.

b) Form und Aussehen der initialen a-Wellen

Die a-Wellen sind bei DA alle gedoppelt (Abb. 3), wobei a_1 kleiner ist als a_2 . Zuweilen meint man auch ein höher sitzendes " a_3 " zu erkennen, das jedoch ein oscillatory potential ist und schon zum positiven Potential der x-Welle gehört, in manchen Fällen aber tiefer sitzt und neben a_2 als " a_3 " imponiert.

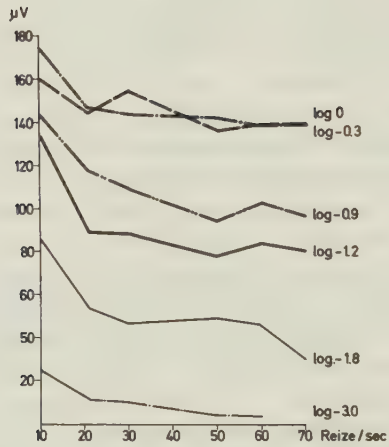


Abb. 4

Amplitude der initialen a-Wellen in μV bei DA und Flimmerreizung mit verschiedenen Lichtintensitäten und Frequenzen.

c) Statistik

Die statistischen Werte sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2

Hertz	-3,0	-1,8	-1,2	-0,9	-0,3	0 log rel. Int.
10	25 $\pm$ 19	86 $\pm$ 27	133 $\pm$ 36	143 $\pm$ 39	174 $\pm$ 40	160 $\pm$ 47
22	12 $\pm$ 16	54 $\pm$ 21	89 $\pm$ 29	117 $\pm$ 38	147 $\pm$ 44	144 $\pm$ 48
30	10 $\pm$ 17	46 $\pm$ 14	88 $\pm$ 28	107 $\pm$ 41	144 $\pm$ 44	154 $\pm$ 44
50	5 $\pm$ 10	49 $\pm$ 17	78 $\pm$ 23	94 $\pm$ 47	142 $\pm$ 46	136 $\pm$ 43
60	4 $\pm$ 6	46 $\pm$ 16	83 $\pm$ 25	102 $\pm$ 33	137 $\pm$ 29	143 $\pm$ 48
70	0	30 $\pm$ 11	80 $\pm$ 9	96 $\pm$ 21	139 $\pm$ 21	139 $\pm$ 33

Die Tabelle enthält die Mittelwerte und die Standardabweichung der initialen a-Wellen bei DA und Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten. Die Werte sind in μ V angegeben. Man sieht, daß die Streuung des Mittelwertes ziemlich gering ist, die Genauigkeit daher groß.

3. Initiale x(b)-Wellen

a) Amplitude der initialen x(b)-Wellen

Die initialen x-Wellen sind so hoch, daß sie zuweilen bei der für die Flimmerwellen erforderlichen Verstärkung den Filmrand überschreiten (Abb. 3).

 α) Abhängigkeit von der Intensität

Die graphische Darstellung der positiven Initialwellen-amplitude ist nicht so klar und deutlich, sondern die Kurven der Intensitäten log-0,3, -0,9 und log-1,2 liegen dicht nebeneinander und überkreuzen sich einigemale, ebenso wie die darunterliegenden von log-1,8 und log 0, so daß das Bild etwas verwirrend ist. Hier fällt sofort der eigenartige Verlauf der stärksten Intensitätslinie auf, die wir eigentlich als oberste der Kurven erwarten. Doch liegen alle Werte bis auf den bei 70 Hertz im Bereich von 210 bis 230 μ V im Niveau der schwachen Intensität von log-1,8. Eine starke Suppression der x-Flimmerwellen bei log 0 und 10 Reizen/sec. fiel ja schon in der Abb. 3 auf. Doch macht sich der Unterdrückungseffekt der starken Intensitäten mithin am deutlich-

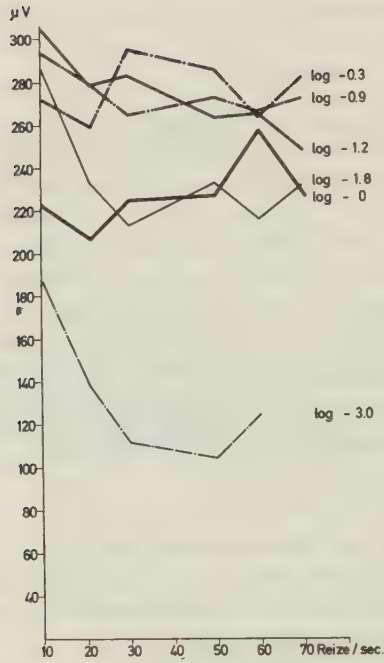


Abb. 5

Amplitude der positiven Initialwellen in μV bei DA und Flimmerreizung mit verschiedenen Lichtintensitäten und Frequenzen.

sten bei den initialen x-Wellen, und zwar bei allen Frequenzen gleichermaßen bemerkbar. Besonders klein im Verhältnis zu den sonst hohen x-Wellen sind die Initialwellen der schwächsten Intensität $\log -3,0$. Sie stehen im krassen Unterschied zu den anderen Intensitätskurven; denn selbst die x-Wellen von $\log -1,8$ haben eine wesentlich höhere Amplitude und verlaufen zusammen mit $\log 0$. Darauf folgenden die anderen Intensitäten.

β) Abhängigkeit von der Frequenz

Der Ausgangswert von 10 Reizen/sec. stellt wie bei den initialen a-Wellen das Maximum der Ausschläge dar. Gemeinsam fallen alle zu 22 Hertz hin ab, am stärksten $\log -3,0$ und $\log -1,8$, die auch bis zu 30 Reizen/sec. noch weiter abnehmen. Die anderen Kurven zeigen ein sehr unterschiedliches Verhalten und folgen keiner erkennbaren Regel. Sie scheinen vielmehr wie die a-Wellen in einem bestimmten Bereich hin- und herzupendeln, der allerdings als sehr breit angegeben werden muß. Dies hängt offenbar mit der oft schwierigen Registrierung der hohen Ausschläge zusammen, der zufolge die Mittelwerte nur auf einigen Messungen beruhen und nicht so genau sind wie die der initialen a-Wellen. Wir werden dies bei der statistischen Auswertung noch sehen.

b) Form und Aussehen der initialen x(b)-Wellen

Die positiven Initialwellen, die bei DA zum Teil so hoch waren, daß sie in den ERG-Kurven nicht auszumessen waren (Abb. 3), bestehen nur zu Anfang nach der fünfminütigen DA bei 10 Reizen/sec. und $\log -3,0$ und $\log -1,8$ aus runden, skotopischen b-Wellen (Abb. 6). Mit steigender Intensität treten x-Wellen auf, denen im unteren Teil des aufsteigenden Schenkels, zuweilen als "a₃" erscheinend, und im oberen oscillatory potentials aufsitzen, was sich auch bei den hohen Frequenzen nicht ändert. Bei 10 Hertz und $\log 0$ nimmt die Größe der positiven Initialwelle stark ab wegen der hohen Intensität. Der Gipfel der x-Welle ist abgestumpft und zeigt zwei bis drei nebeneinanderliegende, kleine Buckel (s. auch Abb. 6). Auch bei steigender Frequenz bewahren die b-Wellen der schwachen Intensitäten ihren skotopischen

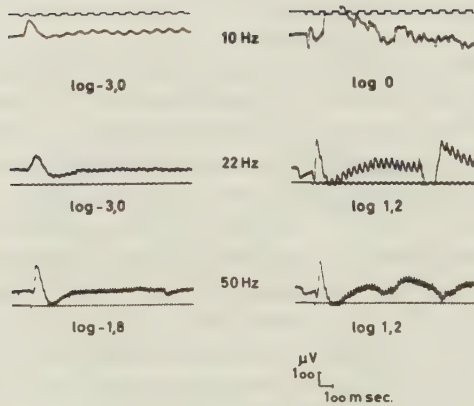


Abb. 6

Es soll insbesondere das Verhalten der Initialwellen bei DA und Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten bei ansteigender Frequenz veranschaulicht werden.

Charakter, nur pflanzen sich kleine x-Wellen auf ihrem Gipfel auf, die der Frequenz entsprechen (Abb. 6, log-3,0 und 22 Hertz) oder bei etwas höherer Intensität auf ihrem absteigenden Schenkel (Abb. 6, log-1,8 und 50 Hertz). Hierdurch wird die b-Welle etwas in die Breite gezogen und ist nicht mit der spitzen x-Welle bei höherer Intensität von log-1,2 (Abb. 6) zu vergleichen. Auch hier sehen wir auf dem absteigenden Schenkel der Frequenz entsprechend kleine x-Wellen. Die x-Wellen im photopischen Bereich besitzen alle die spitze Form, die in Abb. 3B bei 10, 22 und 30 Hertz und in Abb. 6 bei log-1,2 dargestellt ist, sie variieren nur leicht in ihrer Amplitude.

c) Statistik

Die relativ große Streubreite bei den positiven Initialwellen kann aus den angegebenen Werten ersehen werden, die die Tabelle 3 zeigt. Die große Streuung ist auf die mangelhafte Registrierung der großen Ausschläge zurückzuführen. Jedoch liegt sie durchaus im Bereich der physiologischen Schwankungsbreite.

Tabelle 3

Hertz	-3,0	-1,8	-1,2	-0,9	-0,3	0 log rel.Int.
10	187 $\pm$ 53	286 $\pm$ 73	306 $\pm$ 79	293 $\pm$ 70	271 $\pm$ 79	222 $\pm$ 88
22	138 $\pm$ 86	233 $\pm$ 59	279 $\pm$ 68	279 $\pm$ 82	259 $\pm$ 80	207 $\pm$ 87
30	102 $\pm$ 56	213 $\pm$ 68	283 $\pm$ 63	265 $\pm$ 91	296 $\pm$ 85	225 $\pm$ 81
50	104 $\pm$ 83	232 $\pm$ 71	263 $\pm$ 72	272 $\pm$ 77	285 $\pm$ 77	227 $\pm$ 55
60	124 $\pm$ 66	215 $\pm$ 94	265 $\pm$ 78	266 $\pm$ 87	262 $\pm$ 74	257 $\pm$ 88
70		230 $\pm$ 83	247 $\pm$ 45	271 $\pm$ 59	281 $\pm$ 62	228 $\pm$ 86

Die Tabelle enthält die Mittelwerte und die Standardabweichung der initialen x(b)-Wellen in μV bei DA und Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten.

II. Ergebnisse bei DA und Farblichtreizung

Im vorausgehenden haben wir das Verhalten der Flimmerwellen und der initialen Antwort bei weißen Lichtreizen unterschiedlicher Intensitäten untersucht. Nun wollen wir bei Reizung mit physikalisch gleich hellem Licht verschiedener Wellenlänge den Einfluß der Wellenlänge auf die Flimmer- und Initialwellen studieren. Aus diesem Grunde haben wir in den graphischen Darstellungen die Ausschläge in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgetragen, nicht wie bisher in Abhängigkeit von der Frequenz.

1. Flimmerwellen

a) Amplitude der Flimmerwellen

Die subjektive Helligkeit der Farbblitze liegt ungefähr zwischen der von $\log -3,0$ und $\log -1,8$. Es müßte sich aus dieser Tatsache eine gewisse Parallelität zu den Intensitäten betreffs der Frequenzabhängigkeit und der Amplitudenhöhe ergeben, was auch in der Tat zutrifft.

α) Abhängigkeit von der Frequenz

Die Flimmerwellen (Abb. 7) zeigen bei 10 Reizen/sec. bereits ihr Maximum an Amplitude. Die Kurve von 10 Hertz verläuft als oberste zwischen 60 und 90 μV . In relativ großem Abstand folgen dann gemeinsam die Kurven von 22 und 30 Reizen/sec.. Sie liegen sehr nahe zusammen und die 30 Hertz-Linie weicht nur geringfügig hauptsächlich bei 560 m μ von der bei 22 Hertz ab. Sie liegt nur in dem Bereich von 600 bis 535 m μ etwas höher, sonst verläuft sie um einige μV tiefer. In einem großen Abstand folgt nun die Kurve von 42 Reizen/sec. und in einem weiteren von 50 Reizen/sec., wobei der Anfang und auch das Ende der Kurve bereits die Verschmelzung anzeigen. Die FVF der Flimmerwellen bei Reizung mit verschiedener Wellenlänge beginnt bereits bei 50 Hertz und ist endgültig bei 60 Hertz, wie wir aus Probeversuchen ermittelten. Sie hängt jedoch von der Wellenlänge ab.

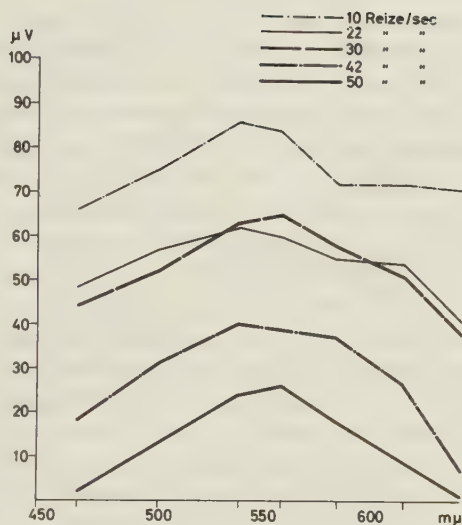


Abb. 7

Amplitude der Flimmerwellen in μV bei DA und Flimmerreizung mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlänge und Frequenz. Die Amplitude der Flimmerwellen ist hier in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgetragen.

β) Abhängigkeit von der Wellenlänge

Diese Abhängigkeit von der Wellenlänge kommt in der Abb. 7 sehr klar zum Ausdruck, denn wenn die Wellenlänge keinen Einfluß auf die Amplitude der Flimmerwellen hätte, müßten wir eine gerade Linie erwarten. Man sieht jedoch, wie die Amplitude, bei 468 mμ noch relativ klein, sich allmählich vergrößert und bei 540 bzw. 560 mμ ihr Maximum erreicht und daraufhin wieder zu 640 mμ hin langsam abnimmt, wobei der Endwert meist niedriger liegt als der Ausgangswert. Nur die Kurve von 10 Reizen/sec. fällt hier etwas aus dem Rahmen. Sie steigt zwar parallel zu den anderen Kurven an und hat ihr Maximum bei 540 mμ mit 68 μV, fällt aber dann etwas steiler ab und hat von 640 bis 584 mμ einen horizontalen Verlauf. Die mittleren Wellenlängen von 540 und 560 mμ vermögen also die größten Ausschläge im Flimmer-ERG auszulösen, obwohl wir bei DA das Maximum an Amplitude bei 510 mμ erwarten müßten, ist es hier ins Photopische verschoben. Als Andeutung eines PURKINJEschen Phänomens könnte man das etwas zum kurzwelligen Bereich verschobene deutliche Maximum bei 540 mμ bei 10 Reizen/sec. zu Beginn der Farblichtreizung betrachten, denn hier ist die DA noch etwas stärker und auch der helladaptierende Effekt der niedrigen Frequenz ist noch nicht so stark, während die anderen Kurven nur geringe Schwankungen zwischen 540 und 560 mμ aufweisen.

b) Form und Aussehen der Flimmerwellen

Wir beginnen mit der Besprechung der Flimmerwellen ausnahmsweise im langwelligen Bereich (Abb. 8), weil hier bei den Versuchen die Reizung ihren Anfang nahm. Da die Amplitudenhöhen der Flimmerwellen weitgehend denen bei den niedrigen Intensitäten folgen, wäre ein ähnliches Verhalten der Flimmerwellenform zu erwarten. So begegnen uns auch bei 10 Reizen/sec. und 640 mμ vorwiegend runde Flimmerwellen (Abb. 8A), die aber in den Wellentälern schon spitze a-Wellen tragen. Ein kurzer non flickering part oder statt dessen reduzierte b-Wellen lassen sich ebenfalls feststellen. Bei 614 mμ

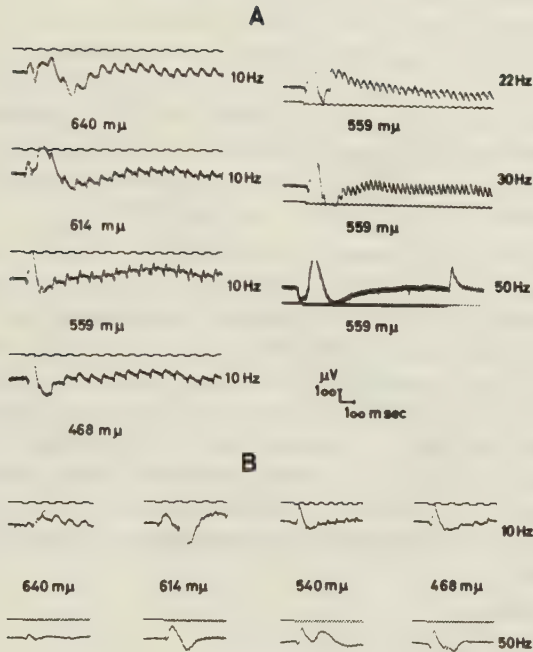


Abb. 8 A

Flimmerwellen bei DA und Reizung mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlänge. Zunächst bei konstanter Frequenz von 10 Hertz (linke Seite), darauf bei ansteigender Frequenz und konstanter Wellenlänge von 559 m μ .

Abb. 8 B

Initiale Wellen bei DA und Farblichtreizung bei 10 Hertz (obere Reihe) und 50 Hertz (untere Reihe) und verschiedenen Wellenlängen.

werden die Flimmerwellen schon polyphasisch und zeigen mitten in den runden b-Wellen photopische x-Wellenspitzen. Von 584 μ p bis 504 beherrschen spitze x-Wellen das Bild, die ihr Maximum bei 560 und 540 μ p haben, wie es an Hand der graphischen Abb. 8 schon beschrieben wurde. Mit dem maximalen Ausschlag der Flimmerwellen geht das Auftreten von kleinen, positiven off-Effekten parallel. Bei 468 μ p nehmen die Wellen wieder einen gemischten Charakter an. Obwohl die a- und x-Wellen überwiegen, machen sich doch skotopische Tendenzen nach dem spitzen Gipfel der Flimmerwellen bemerkbar.

Bei 22 Reizen/sec. haben die Flimmerwellen runde (640, 614, 468 μ p) oder abgestumpfte (584-504 μ p) Gipfel und spitze Wellentäler. Es fällt ein steiler Anstieg und ein sanfterer Abfall der Wellen auf, der ihnen einen leichten Linksdrall verleiht. Oft finden wir bei 640 μ p skotopisch aussehende Flimmerwellen, weniger bei 468 μ p. Dies ist auch bei 30 Reizen/sec. der Fall. Die anderen Wellenlängen haben spitze, diphasische Flimmerwellen meist ohne oscillatory potentials. Bei 42 und 50 Reizen/sec. nimmt die Amplitude immer mehr ab, bis keine Ausschläge mehr auslösbar sind und die FVF erreicht ist.

c) Statistik

Statistische Werte siehe Tabelle 4

Tabelle 4

Hertz	640	614	584	559	540	504	468 μ p
10	71 $\pm$ 19	72 $\pm$ 21	72 $\pm$ 21	84 $\pm$ 24	86 $\pm$ 25	75 $\pm$ 22	66 $\pm$ 24
22	41 $\pm$ 12	54 $\pm$ 12	55 $\pm$ 14	60 $\pm$ 14	62 $\pm$ 14	57 $\pm$ 14	49 $\pm$ 15
30	37 $\pm$ 11	51 $\pm$ 14	58 $\pm$ 15	65 $\pm$ 16	63 $\pm$ 17	52 $\pm$ 18	44 $\pm$ 19
42	7 $\pm$ 12	27 $\pm$ 18	37 $\pm$ 16	39 $\pm$ 23	40 $\pm$ 25	31 $\pm$ 22	18 $\pm$ 20
50	1 $\pm$ 3	9 $\pm$ 14	18 $\pm$ 17	26 $\pm$ 19	24 $\pm$ 18	13 $\pm$ 15	2 $\pm$ 8

Die Tabelle enthält die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der Flimmerwellen in μ V bei DA und Farblichtreizung.

2. Initiale a-Wellen

a) Amplitude der initialen a-Wellen

Die initialen a-Wellen liegen mit ihren Ausschlägen im Bereich von 12 bis 70 μV .

α) Abhängigkeit von der Frequenz

Schon bei flüchtiger Betrachtung (Abb. 9) fällt auf, daß die Kurven der einzelnen Frequenzen nicht gut auseinanderzuhalten sind, sondern sich ziemlich regellos überkreuzen. Ein klein wenig getrennt verlaufen die Frequenzkurven von 50 und 42 Hertz, doch auch sie überkreuzen sich. Der Bereich, den das Kurvenbündel einnimmt, ist jedoch relativ schmal, um 500 $\text{m}\mu$ 15–20 μV , bei 584 nur 8 μV und bei 640 $\text{m}\mu$ 15 μV . Die Frequenz scheint mithin so gut wie keinen Einfluß auf den Amplitudenverlauf zu haben.

β) Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Wellenlänge scheint sich in einer besonders eindrucksvollen Weise in der a-Wellenamplitude niederzuschlagen. Bei 468 $\text{m}\mu$ und vor allem bei 504 $\text{m}\mu$, wo die Kurven noch leicht ansteigen, treffen wir auf die höchsten Ausschläge, von 504 $\text{m}\mu$ fallen alle Frequenzkurven nach 640 $\text{m}\mu$ hin gleichmäßig ab. Dieses Maximum bei 504 $\text{m}\mu$ entspricht dem Maximum des Farben-ERGs bei DA. Wir müssen also bei den Initialwellen eine gute DA annehmen, ganz im Gegensatz zu den Flimmerwellen.

b) Form und Aussehen der initialen a-Wellen

Außer einer kleinen, spitzen a-Welle bei 640 und 614 $\text{m}\mu$ sind die übrigen a-Wellen wie bei der Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten gedoppelt.

c) Statistik

Die statistischen Daten sind aus der Tabelle 5 zu ersehen.

Tabelle 5

Hertz	640	614	584	559	540	504	468 $\mu\mu$
10	29 $\pm$ 14	37 $\pm$ 11	40 $\pm$ 11	52 $\pm$ 13	61 $\pm$ 17	66 $\pm$ 25	65 $\pm$ 27
22	19 $\pm$ 12	33 $\pm$ 11	40 $\pm$ 9	48 $\pm$ 11	56 $\pm$ 18	62 $\pm$ 23	55 $\pm$ 26
30	22 $\pm$ 12	36 $\pm$ 10	40 $\pm$ 12	48 $\pm$ 20	59 $\pm$ 19	70 $\pm$ 26	51 $\pm$ 28
42	12 $\pm$ 12	27 $\pm$ 15	38 $\pm$ 14	42 $\pm$ 17	43 $\pm$ 21	50 $\pm$ 26	47 $\pm$ 23
50	13 $\pm$ 13	29 $\pm$ 13	34 $\pm$ 14	41 $\pm$ 13	49 $\pm$ 27	57 $\pm$ 25	49 $\pm$ 25

Die Tabelle enthält die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der initialen a-Wellen in μV bei DA und Farblichtreizung.

3. Positive Initialwellen

a) Amplitude der positiven Initialwellen

Die Amplituden der positiven Initialwellen sind im Verhältnis sehr groß zumindest gegen Ende der Reizserien bei den kurzwelligen Flimmerreizen. Die höchsten Ausschläge reichen hier bis 290 μV , also wie die bei Reizung mit verschiedenen Intensitäten. Die kleinsten initialen Antworten liegen jeweils am roten Ende des Spektrums bei 63 μV (Abb. 10).

α) Abhängigkeit von der Frequenz

Bei den positiven Initialwellen können wir zumindest bei den Wellenlängen von 468 bis 584 $\mu\mu$ eine Abhängigkeit der Amplitudenhöhe von der Frequenz feststellen, was jenseits dieser Wellenlänge nicht möglich ist, denn dort verlaufen alle Kurven in enger Nachbarschaft und sind nicht mehr nach Frequenzen differenzierbar. Zu oberst verlaufen die Kurven von 22 und 30 Hertz, wobei die 22 Hertz-Kurve am Anfang bei 468 $\mu\mu$ übertrifft. Zwischen den beiden Kurven bei 468 $\mu\mu$ beginnt die von 10 Hertz. Im weiteren Verlauf liegt sie jedoch unter den schon beschriebenen. Bei 559 $\mu\mu$ weist sie eine kleine Abweichung auf. In einem großen Abstand zu den drei Kurven, die ziemlich eng zusammenliegen und sich auch überkreuzen, folgen die Frequenzen von 42 und 50 Hertz. Sie verlaufen von 584 $\mu\mu$ an annähernd horizontal. Die 50 Hertz-Kurve ist die unterste.

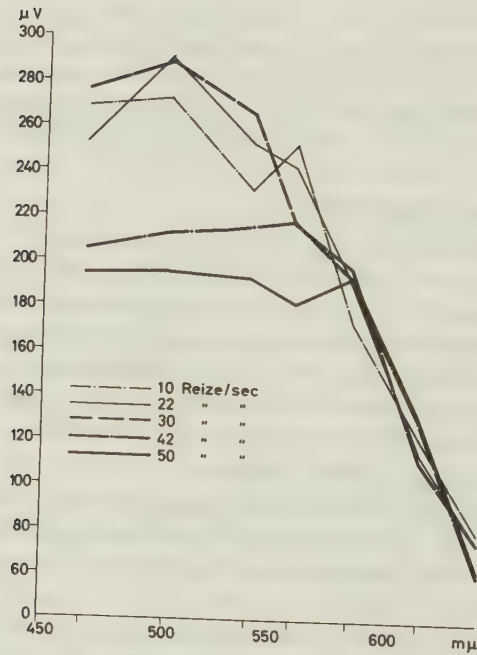


Abb. 10

Amplitude der positiven Initialwellen in μV bei DA und Flimmerreizung mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlänge und Frequenz.

β) Abhängigkeit von der Wellenlänge

Auch hier finden wir ein ähnliches Verhalten wie bei den a-Wellen. Bei 468 mμ bzw. 504 mμ weisen die initialen positiven Wellen die größte Höhe auf, wobei der Höchstwert 290 μV beträgt. Von hier aus fallen alle Kurven zum langwelligen Bereich ab. In diesem Teil des Spektrums sind die positiven Initialwellen also sehr klein und nehmen darauf wie die a-Wellen bei den kurzwelligen Flimmerreizen an Größe zu und haben hier ihr Maximum bei 504 mμ. Bemerkenswert ist, daß ab 584 mμ die Aufsplitterung der Kurven aufhört und sie alle, ungefähr gleich an Amplitude, gemeinsam an Größe verlieren.

b) Form und Aussehen der positiven Initialwellen

Das Aussehen der positiven Initialwellen macht das beschriebene Verhalten ihrer Amplitudenvergrößerung bei unterschiedlicher Wellenlänge deutlich.

Zu Anfang des Flimmervorganges bei 640 mμ (Abb. 8 A und B) bestehen die initialen Antworten aus runden b-Wellen, die dann zuweilen schon bei 614 mμ oder aber dann bei 584 mμ x-Wellen auf ihrem Gipfel tragen. Bei den folgenden Wellenlängen tragen die nun spitzen, hohen x-Wellen im aufsteigenden Schenkel oscillatory potentials und nehmen laufend an Höhe zu, um bei 504 ihr Maximum zu erreichen. Meist oder oft ist hier der Gipfel der x-Welle wegen seiner großen Höhe auf dem Film gar nicht mehr registrierbar. Auch bei den höheren Frequenzen bestehen die positiven Initialwellen im Anfang, d.h. bei 640 mμ aus b-Wellen, die dann aber schnell in x-Wellen übergehen. Im übrigen gleichen die x-Wellen bei höheren Frequenzen in ihrer Form den Weiß-Reizen von log-1,8 oder auch log-0,9 in Abb. 6.

c) Statistik

Die statistischen Werte befinden sich in der Tabelle 6.

Tabelle 6

Hertz	640	614	584	559	540	504	468 μ V
10	80 $\pm$ 28	122 $\pm$ 55	173 $\pm$ 67	252 $\pm$ 87	233 $\pm$ 51	272 $\pm$ 90	269 $\pm$ 78
22	76 $\pm$ 23	115 $\pm$ 29	191 $\pm$ 60	242 $\pm$ 58	253 $\pm$ 17	290 $\pm$ 26	253 $\pm$ 23
30	76 $\pm$ 25	112 $\pm$ 43	197 $\pm$ 73	216 $\pm$ 42	265 $\pm$ 79	228 $\pm$ 79	276 $\pm$ 74
42	64 $\pm$ 25	129 $\pm$ 65	193 $\pm$ 59	218 $\pm$ 57	215 $\pm$ 55	212 $\pm$ 57	205 $\pm$ 61
50	63 $\pm$ 33	130 $\pm$ 80	194 $\pm$ 86	181 $\pm$ 75	192 $\pm$ 81	195 $\pm$ 18	194 $\pm$ 34

Die Tabelle enthält die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der positiven Initialwellen in μ V bei DA und Reizung mit verschiedenen Farblichtern. In relativem Verhältnis zu den hohen Ausschlägen der positiven Initialwellen steht die große Streubreite.

III. Ergebnisse bei HA und Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten

1. Flimmerwellen

a) Amplitude der Flimmerwellen

Den Ergebnissen bei DA stehen diejenigen bei HA gegenüber. Es fällt auf, daß die Amplitude der ERG-Wellen im Durchschnitt größer ist.

α) Abhängigkeit von der Intensität

Genau wie bei DA stellt man eine Abhängigkeit der Amplitudenhöhe von der Intensität fest (Abb. 11). Ein Unterschied ergibt sich jedoch schon bei der Intensität $\log -3,0$, deren Flimmern bei HA eben gerade noch subjektiv wahrgenommen werden kann, aber im ERG keine meßbaren Potentiale auszulösen vermag. Die erste Flimmerwellenkurve beginnt deswegen bei Intensität $\log -1,8$ bei 76 μ V, darauf folgen in einem Abstand $\log -1,2$ und $-0,9$ und $\log -0,3$. Eine strenge logarithmische Intensitätsabhängigkeit kann man hier nicht feststellen. Die Intensität $\log 0$ verhält sich in ihrem Anfang insofern auffällig, als sie wegen ihrer niedrigen Amplitude bei 10 Reizen/sec. die beiden vorigen Kurven überkreuzen muß, um dann hingegen dicht über der von $\log -0,3$ weiterzuverlaufen.

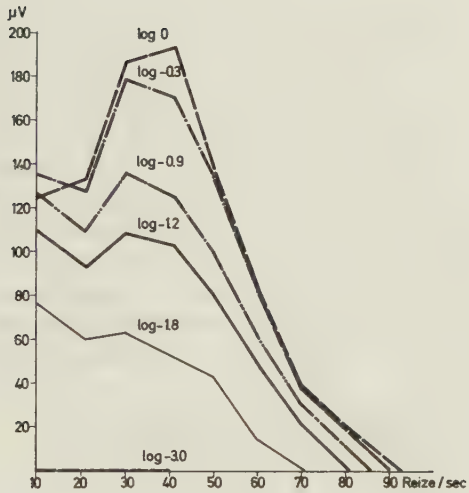


Abb. 11

Amplitude der Flimmerwellen in μV bei HA und Flimmer-
reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten und
Frequenzen.

β) Abhängigkeit von der Frequenz

Bemerkenswert ist, daß alle Kurven von ihrem Ausgangswert bei 10 Hertz abfallen und so ein Minimum bei 22 Hertz aufweisen. Lediglich die höchste Intensität, die bei 10 Reizen/sec. eine auffallend kleine Amplitude aufweist, steigt zu 22 Hertz hin an. Bei 30 Reizen/sec. nehmen alle Kurven an Größe zu, die oberen sehr stark, die unteren von $\log -1,8$ und $\log -1,2$ überragen jedoch nicht ihren Ausgangswert, wobei $\log -1,8$ fast horizontal verläuft. Haben alle übrigen Intensitäten bei 30 Hertz ihr Maximum erreicht und fallen sanft zu 42 Hertz und steiler zu den hohen Frequenzen hin ab, so liegt das Maximum von $\log 0$ erst bei 42 Hertz. Diese Erscheinung ist erstaunlich, da sonst bei keiner Intensität die Amplitude von 30 Hertz ansteigt. Nach diesem hohen Gipfel verläuft die $\log 0$ -Kurve nahe an der von $0,3$ entlang und verschmilzt ungefähr bei 93 Reizen/sec.. Die FVF der anderen Intensitäten liegt entsprechend tiefer und ist aus der Abb. 11 abzulesen.

b) Form und Aussehen der Flimmerwellen

Gegenüber den Flimmerwellen bei DA weisen diejenigen bei HA eine auffallende Vielgestaltigkeit auf und unterscheiden sich nicht nur in der Amplitudenhöhe und der FVF sondern auch in ihrem Aussehen und ihrer Gestalt.

Bei 10 Hertz (Abb. 12) löst die Intensität $\log -2,0$ keine Flimmerwellen und initialen Antworten aus, wie erwähnt. Bei $\log -1,8$ hingegen zeigen sich photopische Flimmerwellen. Auf einige dieser Flimmerwellen folgt ein kleiner, positiver off-Effekt, der besonders hinter den letzten x-Wellen zu sehen ist. Bei $\log -0,9$ wird dieser off-Effekt höher wie auch die Flimmerwellen, und man kann hinter ihm einen zweiten, kleineren erkennen. Die a-Wellen sind oft doppelgipflig und die x-Wellen tragen sowohl im auf- als auch im absteigenden Schenkel oscillatory potentials. Genau wie bei DA

folgt bei $\log -0,3$ und $\log 0$ ein Übergang in ein negatives Flimmern, bei dem die a-Wellen sehr tief werden, in der Abb. 12 auch gedoppelt sind und die x-Wellen durch zahlreiche oscillatory potentials abgestumpft werden. Außerdem ist ihre Größe, wie der kleine Wert in Abb. 11 veranschaulicht, stark reduziert. Die off-Effekte sind in diesen Aufnahmen immer noch zu sehen (Abb. 12).

Bei 22 Reizen/sec. werden die Wellen, wie beschrieben, diphasisch und unterscheiden sich kaum von denen bei DA. Als Besonderheit ist zu berichten, daß bei 30 Hertz insbesondere bei den Intensitäten $\log -1,2$ und $\log -0,9$, teilweise auch bei $\log -0,3$ nach den spitzen x-Gipfeln sehr deutliche, kleine Potentiale auftreten, wie sie ähnlich auch bei 22 Reizen/sec. zu sehen waren, nur sind sie jetzt deutlicher, da der x-Gipfel gewachsen ist und so das zweite kleine, nach ihm kommende b-Potential um ein großes Stück überragt. Bei $\log 0$ und auch bei $\log -0,3$ sind diese Potentiale gerade noch zu erkennen.

Bei 42 Hertz schließlich wird das Bild noch vielfältiger und besteht aus mehreren Varianten, die bei den stärkeren Intensitäten ab $\log -0,9$ besonders ausgeprägt sind. Zuerst fällt auf, daß in der unteren Abbildung der ersten Reihe der Abb. 12 die beschriebenen kleinen Potentiale nun nicht mehr im absteigenden, sondern im aufsteigenden Teil sitzen, und zwar ganz kurz vor dem spitzen x-Gipfel. In der nächsten Kurve bei 42 Hertz finden wir ein ähnliches Verhalten, nur sitzt das Potential hier auf halber Höhe des aufsteigenden Schenkels. Der untere Teil der Welle ist stärker ausgezogen als der nach dem kleinen Potential kommende steile Gipfel. Dies zeigt, daß es sich bei dem nach diesem Potential auftretenden Ausschlag um einen äußerst schnellen handeln muß, der deswegen photographisch schwächer ausgezeichnet ist.

Man könnte die stark gefärbte Schwingung als "Grundschwingung" bezeichnen, da die spitzen Gipfel ihr nur aufgesetzt zu sein scheinen. In dem folgenden ERG kommt die "Grundschwingung" nicht so gut zur Geltung. Dafür haben die Wellen hier eine andere Eigenart, sie wechseln nämlich in ihrer Höhe. Auf eine kleinere folgt eine größere und darauf wieder eine kleinere, ein alternierendes Flimmern also, wie es von BEST und BOHNEN beschrieben wurde. Außer den behandelten Wellenformen gibt es bei 42 Hertz auch einfache, diphasische Flimmerwellen, die keines dieser Merkmale aufweisen.

Auch bei 30 Reizen/sec. finden wir die genannten Flimmertypen wieder. Zu der zweiten Abbildung bei 50 Reizen/sec. ist zu bemerken, daß wir auch hier ein alternierendes Flimmern beobachten. Zu erwähnen ist weiter, daß bei den kleineren Ausschlägen das kleine Potential im aufsteigenden Teil niedriger ist, als bei den größeren, wo es der Spitze näher rückt. Durch das Höherwerden dieses Potentials - vorher bezeichneten wir das Potential bis dahin als Grundschwingung - wird der Ausschlag der Flimmerwellen mithin vergrößert, was sehr aufschlußreich ist.

Bei 60 Hertz haben die Flimmerwellen ein unkompliziertes, einfaches, diphasisches Aussehen, obwohl auch ganz vereinzelt mal der Flimmertyp mit der stark gezeichneten Grundschwingung vorkommt. Alternierendes Flimmern ließ sich bei dieser Frequenz nur einmal finden. Bei 70 und 80 Hertz werden die Flimmerwellen immer kleiner und verschmelzen schließlich bei 80 bis 95 Hertz, je nach Intensität.

c) Statistik

Die statistischen Werte sind aus der Tabelle 7 zu ersehen.

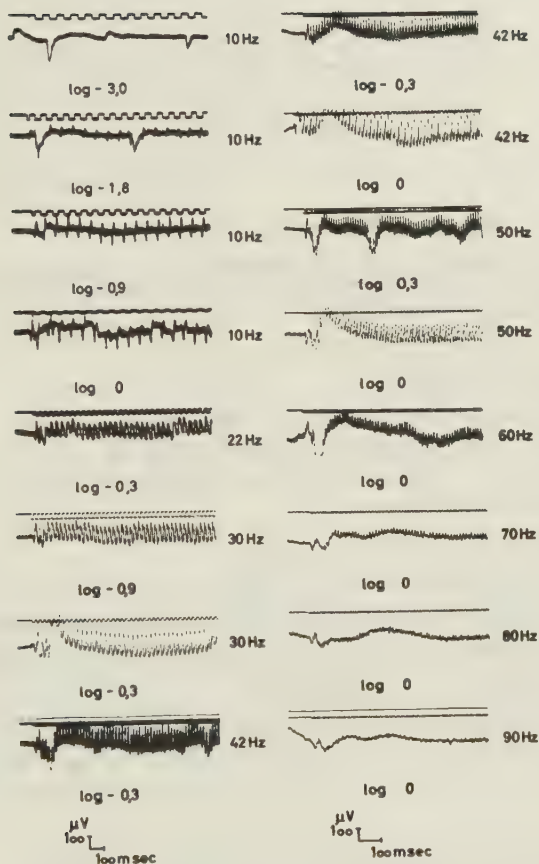


Abb. 12

Flimmerwellen bei HA und Reizung mit verschiedenen Intensitäten bei ansteigender Frequenz bis zur FVF. Für die Kurven von 70 bis 90 Hertz wurde der Transport des Filmes schneller gestellt, es gilt hier der unter der rechten Reihe angegebene Maßstab, für alle anderen gilt der linke.

Tabelle 7

Hertz	log-3,0	-1,8	-1,2	-0,9	-0,3	0 log rel.Int.
10	o	76 $\pm$ 14	109 $\pm$ 22	127 $\pm$ 26	135 $\pm$ 34	125 $\pm$ 31
22	o	60 $\pm$ 15	93 $\pm$ 19	110 $\pm$ 25	128 $\pm$ 29	133 $\pm$ 38
30	o	63 $\pm$ 17	109 $\pm$ 26	136 $\pm$ 33	179 $\pm$ 39	187 $\pm$ 43
42	o	53 $\pm$ 15	103 $\pm$ 25	126 $\pm$ 28	171 $\pm$ 35	194 $\pm$ 9
50		43 $\pm$ 16	80 $\pm$ 20	100 $\pm$ 20	134 $\pm$ 28	138 $\pm$ 28
60		14 $\pm$ 16	49 $\pm$ 12	62 $\pm$ 13	81 $\pm$ 20	83 $\pm$ 21
70		1 $\pm$ 6	21 $\pm$ 14	30 $\pm$ 12	37 $\pm$ 15	39 $\pm$ 16
80		o	2 $\pm$ 6	11 $\pm$ 13	18 $\pm$ 15	20 $\pm$ 16
90		o	o	o	1 $\pm$ 1	5 $\pm$ 4

Die Tabelle enthält die Mittelwerte und die Standardabweichung der Flimmerwellen in μV bei HA und Reizung mit verschiedenen Intensitäten.

2. Initiale a-Wellen

a) Amplitude der initialen a-Wellen

Die initialen a-Wellen bei HA haben eine *k l e i n e r e* A m p l i t u d e als die bei DA und liegen zwischen 14 und 87 μV (Abb. 13).

α) Abhängigkeit von der Intensität

Es besteht bei den initialen a-Wellen eine gute Korrelation zur Intensität. Die einzelnen Kurven verlaufen ungefähr im gleichen Abstand voneinander und überkreuzen sich nie.

β) Abhängigkeit von der Frequenz

Eine Abhängigkeit von der Frequenz kann man nicht feststellen, denn alle Intensitäten bewegen sich ungefähr auf der Horizontalen mit kleinen Abweichungen nach unten und oben.

b) Form und Aussehen der initialen a-Wellen

Die Gestalt der initialen a-Wellen ist einfach und spitz (Abb. 12).

c) Statistik

Die statistischen Werte sind in der Tabelle 8 aufgeführt.

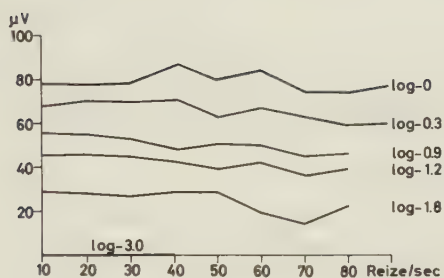


Abb. 13

Amplitude der initialen a-Wellen in μV bei HA und Flimmerreizung mit verschiedenen Lichtintensitäten und Reizfrequenzen.

Tabelle 8

Hertz	log -3,0	-1,8	-1,2	-0,9	-0,3	0 log rel.Int.
10	o	39 $\pm$ 13	45 $\pm$ 12	56 $\pm$ 12	68 $\pm$ 19	78 $\pm$ 20
22	o	28 $\pm$ 10	46 $\pm$ 14	55 $\pm$ 10	71 $\pm$ 17	78 $\pm$ 20
30	o	27 $\pm$ 12	45 $\pm$ 13	53 $\pm$ 10	70 $\pm$ 15	79 $\pm$ 15
42	o	29 $\pm$ 13	42 $\pm$ 12	48 $\pm$ 14	71 $\pm$ 17	87 $\pm$ 12
50		29 $\pm$ 11	39 $\pm$ 11	51 $\pm$ 15	63 $\pm$ 19	80 $\pm$ 24
60		19 $\pm$ 15	42 $\pm$ 14	50 $\pm$ 19	67 $\pm$ 15	84 $\pm$ 30
70		14 $\pm$ 15	35 $\pm$ 13	45 $\pm$ 14	63 $\pm$ 16	75 $\pm$ 25
80		22 $\pm$ 12	39 $\pm$ 13	46 $\pm$ 12	59 $\pm$ 16	74 $\pm$ 17
90					60 $\pm$ 10	77 $\pm$ 27

Die Tabelle enthält die Mittelwerte und die Standardabweichung der initialen a-Wellen in μV bei HA und Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten.

3. Initiale x-Wellen

a) Amplitude der initialen x-Wellen

Auch die initialen x-Wellen sind relativ klein und etwa doppelt so groß wie die a-Wellen (Abb. 14).

α) Abhängigkeit von der Intensität

Auch hier bewirkt der Einfluß der Intensität eine entsprechend gestufte Verteilung der Intensitätskurven: zu unterst log-1,8, darauf in einem größeren Abstand log-1,2 und in einem etwas kleineren log-0,9 und schließlich dicht zusammen log-0,3 und log 0. Die Kurve von log 0 hat zwar den gleichen Ausgangswert wie log-0,3, fällt aber wider Erwarten bei 22 Hertz stark ab und gewinnt erst darauf ihre eigentliche Position über der log -0,3 - Kurve.

β) Abhängigkeit von der Frequenz

Auch die Abhängigkeit von der Frequenz ist bei HA deutlich. Man kann die x-Wellenkurven sogar mit denen der Flimmerwellenkurven vergleichen, denn sie verlaufen ähnlich, doch lassen sie das Absinken bei 22 Hertz vermissen, was nur bei log 0 zu verzeichnen ist. Die Wellen der übrigen Intensitäten steigen bei 10 Hertz über 22 Hertz zu ihrem Maximum bei 30

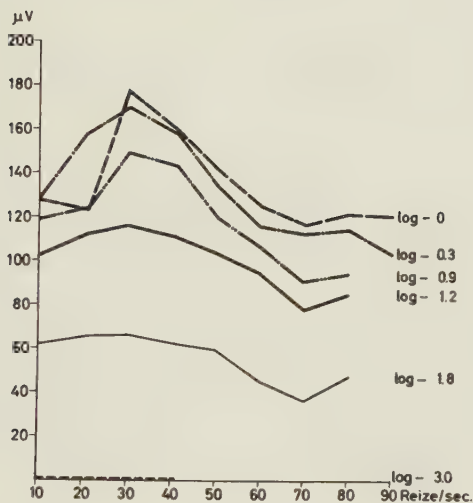


Abb. 14

Amplitude der initialen x-Wellen in μV bei HA und Flimmerreizung mit verschiedenen Intensitäten und Reizfrequenzen.

Hertz an. Die unteren nur ganz wenig, die oberen, $\log -0,9$ und $\log -0,3$, steiler. Auch die Werte der Maxima entsprechen annähernd denen der Flimmerwellen. Sie liegen nur um wenige μV tiefer. Der Abfall der x-Wellen zu den höheren Frequenzen hin verläuft ebenfalls ähnlich, aber etwas flacher. Bei 70 Hertz schließlich ist eine Cäsur. Hier gewinnen die x-Wellen wieder geringfügig an Größe und scheinen jetzt um einen gewissen Wert herumzupendeln, so daß hier die Frequenz keinen Einfluß mehr ausübt.

b) Form und Aussehen der initialen x-Wellen

Wie die initialen x-Wellen bei HA in ihrer Amplitude den Flimmerwellen ähneln, so auch in ihrem Aussehen. Sie sind spitz und tragen wie die Flimmerwellen gelegentlich oscillatory potentials im unteren und oberen Teil des aufsteigenden Schenkels. Die Form gleicht sonst sehr den Flimmerwellen, nur behalten die initialen x-Wellen bei deren Verschmelzen bzw. Kleinerwerden trotzdem eine gewisse Höhe bei, die dann einer Einzelblitzantwort entspricht. Eine Suppression der hohen Intensitäten $\log -0,3$ und $\log 0$ bei 10 Reizen/sec. ist nicht immer zu verzeichnen, jedoch oft der Fall. Sie erfolgt in vollem Ausmaß erst bei 22 Hertz und $\log 0$.

c) Statistik

Die statistischen Daten veranschaulicht Tabelle 9.

Tabelle 9

Hertz	$\log -3,0$	-1,8	-1,2	-0,9	-0,3	0 $\log \text{ rel. Int.}$
10	0	62 ± 17	102 ± 32	119 ± 35	128 ± 38	127 ± 42
22	0	65 ± 21	112 ± 28	123 ± 28	158 ± 33	123 ± 47
30	0	66 ± 23	116 ± 32	149 ± 40	170 ± 43	177 ± 48
42	0	62 ± 17	111 ± 32	143 ± 42	158 ± 36	161 ± 30
50		59 ± 24	104 ± 36	120 ± 32	135 ± 30	143 ± 34
60		45 ± 31	94 ± 22	107 ± 27	116 ± 29	125 ± 49
70		36 ± 25	78 ± 20	91 ± 25	113 ± 18	117 ± 31
80		48 ± 25	85 ± 17	94 ± 12	115 ± 27	122 ± 32
90					104 ± 28	121 ± 41

Die Tabelle enthält die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der initialen x-Wellen in μV bei HA und Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten.

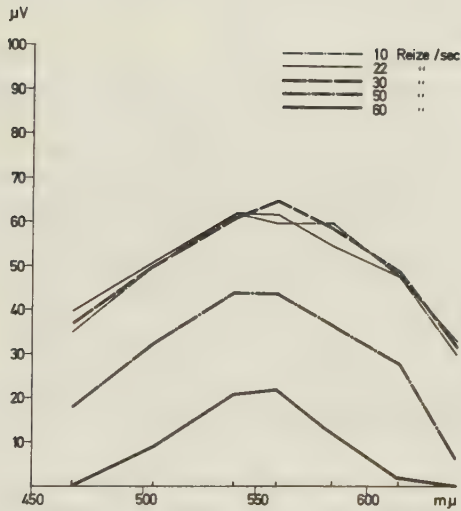


Abb. 15

Amplitude der Flimmerwellen in μV bei HA und Flimmer-
reizung mit monochromatischem Licht verschiedener
Wellenlänge und Reizfrequenz.

IV. Ergebnisse bei HA und Farblichtreizung

1. Flimmerwellen

a) Amplitude der Flimmerwellen

Der Einfluß der HA auf die Flimmerwellen bei Flimmerreizen verschiedener Wellenlängen wird auf Abb. 15 deutlich. Die Flimmerwellen weisen ein Maximum bei 65 μV auf.

α) Abhängigkeit von der Frequenz

Die einzelnen Frequenzkurven verlaufen, wie wir sehen, in etwas anderer Form als bei DA. Die größten Ausschläge liefern gleichermaßen die Frequenzen 10, 22 und 30 Hertz. Sie haben nahezu die gleichen Werte und unterscheiden sich mithin in ihrer Amplitudenhöhe kaum. Nur bei 10 Hertz verlieren die Flimmerwellen im langwelligen Bereich schneller an Größe als die bei 22 und 30 Reizen/sec.. In größerem Abstand folgen die Kurven von 50 und 60 Hertz, wo die Amplitude langsam bis zur FVF fällt.

β) Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Wellenlänge schlägt sich in vollkommen gleicher Weise in den Flimmerwellenamplituden nieder wie bei DA. Das Maximum liegt bei 560 bis 540 $\text{m}\mu$, und der Abfall erfolgt fast nach beiden Seiten gleichermaßen. Nur bei den Kurven von 10 und 60 Hertz liegen die Werte im langwelligen Bereich etwas tiefer. Auch die Verschmelzung tritt hier etwas schneller als bei den kurzwelligeren Lichtblitzen ein, doch ist der Unterschied nur geringfügig.

b) Form und Aussehen der Flimmerwellen

Die Form der Flimmerwellen bei HA gleicht denen bei DA sehr bis auf die Amplitudenhöhe (Abb. 16). Bei 640 $\text{m}\mu$ beherrschen Flimmerwellen mit kleinen a-Wellen und anfangs runden b-Wellen, denen ein x-Gipfel aufgepflanzt ist, das Bild. Bei 614 $\text{m}\mu$ nimmt das ERG an photopischem Aussehen zu und besteht bei 559 bis 504 $\text{m}\mu$ aus a-Wellen und spitzen x-Wellen mit nachfolgendem markanten off-Effekt, der sogar manchmal von einem zweiten, kleinen gefolgt zu sein scheint. Seine Existenz ist jedoch keineswegs

sicher. Bei 468 mp werden die Flimmerwellen wieder flacher und der off-Effekt verliert sich. Zu den anderen Reizfrequenzen ist nichts besonderes zu bemerken. Bei 22 Reizen/sec. nehmen die Wellen diphasischen Charakter an mit nach links geneigten Flimmerwellen und abgestumpften Gipfelpunkten, die bei 30 Hertz dann gerader stehen und spitze Gipfel besitzen. Bei 50 und 60 Hertz werden die Wellen immer kleiner und verschmelzen schließlich.

c) Statistik

Die statistischen Werte enthält Tabelle 10.

Tabelle 10

Hertz	640	614	584	559	540	504	468 mp
10	30 $\pm$ 14	48 $\pm$ 13	60 $\pm$ 15	60 $\pm$ 37	62 $\pm$ 28	50 $\pm$ 14	35 $\pm$ 13
22	32 $\pm$ 9	48 $\pm$ 10	54 $\pm$ 9	62 $\pm$ 10	62 $\pm$ 12	51 $\pm$ 9	40 $\pm$ 9
30	32 $\pm$ 11	49 $\pm$ 9	59 $\pm$ 12	65 $\pm$ 14	61 $\pm$ 26	50 $\pm$ 14	37 $\pm$ 12
50	6 $\pm$ 6	28 $\pm$ 15	40 $\pm$ 15	44 $\pm$ 14	44 $\pm$ 14	33 $\pm$ 8	18 $\pm$ 12
60	0	2 $\pm$ 5	12 $\pm$ 12	22 $\pm$ 14	21 $\pm$ 12	9 $\pm$ 10	0

Die Tabelle enthält die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der Flimmerwellen in μ V bei HA und Reizung mit verschiedenen Farben. Die Streubreite bzw. die Standardabweichung ist ziemlich klein.

2. Initiale a-Wellen

a) Amplitude der initialen a-Wellen

Die initialen a-Wellen haben insgesamt eine sehr kleine Amplitude. Sie bewegen sich im engen Bereich von 4 bis 31 μ V. Diese geringe Größe macht ihre Messung oft schwierig oder sogar unmöglich (Abb. 17).

α) Abhängigkeit von der Frequenz

Der Einfluß der Frequenz auf die initialen a-Wellen ist sehr gering, denn sämtliche Frequenzkurven verlaufen gebündelt ungefähr im selben Bereich, der 30 μ V nicht übersteigt und damit sehr niedrig liegt. Nur bei der höchsten Frequenz von 60 Hertz sehen wir zu Anfang und Ende der Kurve einen etwas steileren Abfall, der auf die hohe Frequenz zurückzuführen ist.

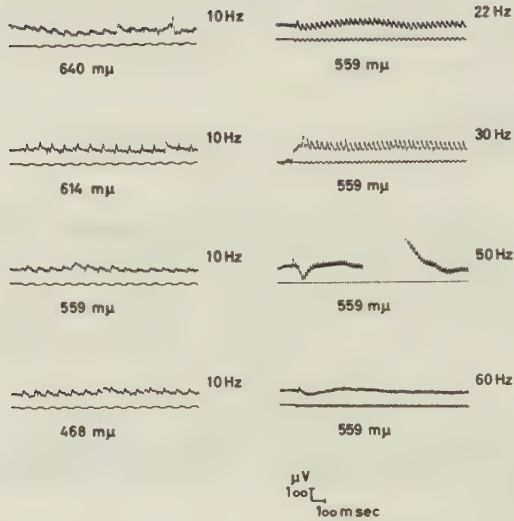


Abb. 16

Flimmerwellen bei HA und Flimmerreizung mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlänge. In der linken Reihe bei der Frequenz von 10 Hertz und verschiedenen Wellenlängen, in der rechten Reihe bei ansteigender Frequenz und 559 mμ.

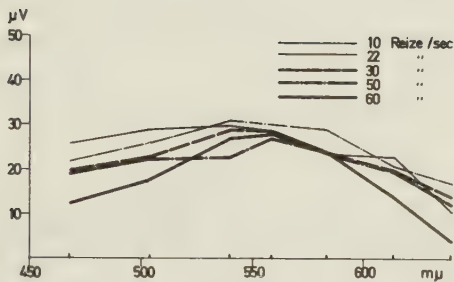


Abb. 17

Amplitude der initialen a-Wellen in μV bei HA und Flimmerreizung mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlänge und Reizfrequenz.

β) Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Kurven, die im Bereich von 26-12 μV beginnen, erheben sich, um bei 540 und 560 $\text{m}\mu$ ein leichtes Maximum zu erreichen und von da wieder sanft abzufallen. Einen stärkeren Einfluß der Wellenlänge kann man praktisch nur bei 60 Hertz feststellen. Hier nimmt die Amplitude zu beiden Enden des Spektrums hin merklich ab, während die anderen Frequenzkurven nur leicht der Wellenlänge unterliegen.

b) Form und Aussehen der initialen a-Wellen

Wie man nicht anders erwartet, sind bei HA auch die farbsensitiven initialen a-Wellen von spitzem, einfachen Aussehen und zeigen keine Besonderheiten (Abb. 16.)

c) Statistik

Die Werte sind in der Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11

Hertz	640	614	584	559	540	504	468 $\text{m}\mu$
10	17 $\pm$ 16	21 $\pm$ 13	29 $\pm$ 9	30 $\pm$ 9	31 $\pm$ 10	26 $\pm$ 7	22 $\pm$ 9
22	10 $\pm$ 10	23 $\pm$ 7	34 $\pm$ 11	29 $\pm$ 10	30 $\pm$ 7	29 $\pm$ 16	26 $\pm$ 16
30	14 $\pm$ 13	20 $\pm$ 17	24 $\pm$ 9	29 $\pm$ 9	29 $\pm$ 10	23 $\pm$ 11	20 $\pm$ 10
50	12 $\pm$ 12	20 $\pm$ 11	24 $\pm$ 11	27 $\pm$ 10	23 $\pm$ 13	23 $\pm$ 9	19 $\pm$ 8
60	4 $\pm$ 4	14 $\pm$ 11	24 $\pm$ 12	27 $\pm$ 6	27 $\pm$ 7	18 $\pm$ 12	12 $\pm$ 12

Die Tabelle enthält die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der initialen a-Wellen in μV bei HA und Farblichtreizung.

3. Initiale x-Wellen

a) Amplitude der initialen x-Wellen

Auch die x-Wellen sind in ihrer Größe stark reduziert. Über das Höchstmaß von 74 μV kommen sie nicht mehr hinaus. Bei 60 Hertz und 640 $\text{m}\mu$ stehen sie sogar vor der Fusion (Abb. 18).

α) Abhängigkeit von der Frequenz

Wieder können wir die ersten drei Frequenzkurven nicht genau trennen. Doch kann man wohl sagen, daß bei 22 und 30 Hertz die höchsten Ausschläge vorkommen und die x-Wellen

bei 10 Reizen/sec. den beiden genannten Frequenzen an Größe geringfügig nachstehen, obwohl bei 504 μ die 30 Hertzkurve infolge eines etwas aus der Reihe fallenden Wertes die 10 Hertzkurve überkreuzt. Im kurzen Intervall folgen die Kurven von 50 und 60 Hertz, die kleinere Amplituden zeigen. Mithin können wir hier eine Abhängigkeit von der Frequenz konstatieren.

β) Abhängigkeit von der Wellenlänge

Bei den kurzwelligen Reizserien nehmen alle Frequenzkurven an Größe zu und erreichen bei gelbgrün 540 oder 560 μ ihr Maximum wie schon die initialen a-Wellen und auch die Flimmerwellen. Der Abfall zum roten Bereich erfolgt auch hier steiler, und die Werte liegen unter denen bei 468 μ . Bei 60 Hertz werden die x-Wellen hier so klein, daß sie mitunter kaum noch zu messen sind.

b) Form und Aussehen der initialen x-Wellen

Die initialen Antworten sind bei HA alle photopischer Natur, soweit man das bei der oft geringen Größe feststellen kann. Auf der halben Höhe ihres aufsteigenden Schenkels (vom Tiefpunkt der initialen a-Welle an gerechnet) besitzen die initialen x-Wellen fast ausnahmslos ein oscillatory potential (Abb. 16). Darauf folgt dann der spitze x-Gipfel, auf dessen absteigendem Teil ebenfalls ein oscillatory potential sitzt. Am besten kann man ihre Gestalt bei 10, 22, 30 Reizen/sec. beurteilen, da sie bei höherer Frequenz oft schon zu klein sind.

c) Statistik

Die statistischen Werte finden sich in der Tabelle 12.

Tabelle 12

Hertz	640	614	584	559	540	504	468 μ
10	39 $\pm$ 12	53 $\pm$ 10	59 $\pm$ 14	68 $\pm$ 17	66 $\pm$ 17	62 $\pm$ 10	46 $\pm$ 17
22	40 $\pm$ 7	59 $\pm$ 17	63 $\pm$ 15	70 $\pm$ 16	74 $\pm$ 22	68 $\pm$ 22	47 $\pm$ 11
30	39 $\pm$ 14	56 $\pm$ 15	66 $\pm$ 17	72 $\pm$ 19	74 $\pm$ 23	56 $\pm$ 19	48 $\pm$ 17
50	28 $\pm$ 20	46 $\pm$ 11	56 $\pm$ 18	66 $\pm$ 21	62 $\pm$ 22	50 $\pm$ 18	35 $\pm$ 19
60	10 $\pm$ 10	39 $\pm$ 16	49 $\pm$ 18	56 $\pm$ 14	60 $\pm$ 15	45 $\pm$ 18	31 $\pm$ 21

Die Tabelle enthält die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung der initialen x-Wellen in μ V bei HA und Farblichtreizung.

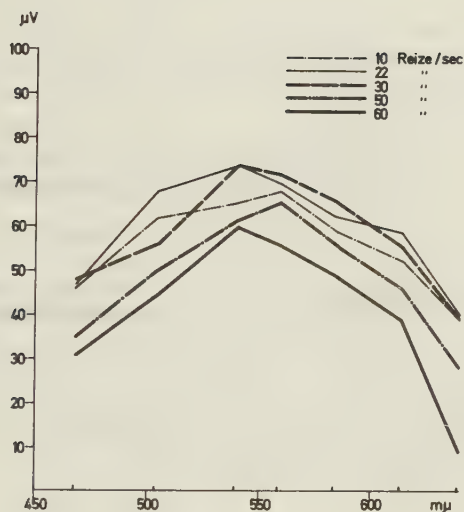


Abb. 18

Amplitude der initialen x-Wellen in μV bei HA und Flimmerreizung mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlänge und Reizfrequenz.

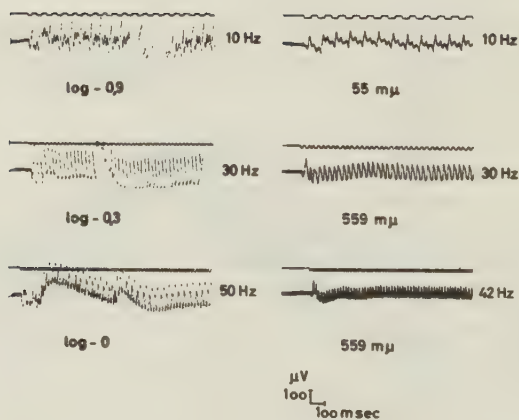


Abb. 19

Flimmerwellen bei mesopischer Adaptation, die einer Raumbeleuchtung von etwa 40 Lux entspricht und Reizung mit Flimmerlicht verschiedener Intensitäten und Wellenlängen. Rechte Spalte zeigt die Reizung mit gleicher Wellenlänge von 559 mμ, die linke mit verschiedener Intensität.

V. Ergebnisse bei mesopischer Adaptation und Reizung mit verschiedenen Intensitäten und Farblichtern

Bei zwei Versuchspersonen führten wir die beschriebenen Versuche nicht bei voller HA durch, sondern bei diffuser Raumbeleuchtung, die etwa 40 Lux über dem Auge der Versuchsperson entsprach, also bei mesopischer Adaptation.

1. verschiedene Lichtintensitäten

a) Amplitudenhöhe der Flimmerwellen

Es ergab sich eine ä u ß e r s t h o h e F l i m m e r w e l l e n a m p l i t u d e. Ihr Maximum lag bei den beiden Versuchspersonen zwischen 280 und 300 μV bei 22 und 30 Hertz und Intensität log 0. Diese ungewöhnlich hohen Ausschläge treffen wir vorwiegend bei den niederen Frequenzen an. Die FVF liegt ungefähr bei 90 Hertz.

b) Form und Aussehen der Flimmerwellen

Die F l i m m e r w e l l e n z e i c h n e n s i c h bei 10 Hertz durch a u ß e r g e w ö h n l i c h h o h e, s p i t z e e r s t e o f f - E f f e k t e aus, die von einer zweiten Schwankung gefolgt werden (Abb. 19). Bei den Flimmerwellen der Frequenzen 22 und 30 Hertz ist nichts besonderes zu berichten außer ihrer schon erwähnten, großen Amplitude. Bei 40 und 50 Reizen/sec. finden wir die bei HA charakterisierten Flimmertypen in annähernd gleicher Form. Nur ist zu sagen, daß d a s a l t e r n i e r e n d e F l i m m e r n h i e r w e s e n t l i c h d e u t l i c h e r ist, d.h. der Unterschied zwischen großen und kleinen Wellen ist sehr viel ausgeprägter. Diese Flimmerpotentiale tragen auf ihren Gipfeln zum Teil auch kleine oscillatory potentials. Besonders die niedrigen Potentiale zeigen eine nicht zu übersehende Doppelgipflichkeit bei der höchsten Intensität log 0 und 50 Hertz (Abb. 19).

2. Farblichtreizung

a) Amplitudenhöhe der Flimmerwellen

Auch bei den farbsensitiven Flimmerreizungen fällt die hohe Amplitude der Flimmerwellen sofort ins Auge. Das Maximum

liegt hier bei der Reizfrequenz von 10 Hertz bei 559 und 540 μV mit 140 μV . Bei 22 Hertz fällt die Amplitude etwas, um bei 30/sec. wieder ein Maximum zu erreichen, das etwa bei 135 μV , also etwas unter dem Höchstwert bei 10 Reizen/sec. liegt. Die FVF setzt bei 60 Hertz ein und liegt bei den mittleren Wellenlängen bei 70 Reizen/sec..

b) Form und Aussehen der Flimmerwellen

Die Form der Flimmerwellen gleicht grundsätzlich der bei HA, nur sind die off-Effekte bei 10 Reizen/sec. sehr viel ausgeprägter und höher, so daß ein deutlich dreigipfliges ERG entsteht. Bei 42 Reizen/sec. registrierten wir bei 584, 559, 540 und 504 μV ein alternierendes Flimmern, das am besten bei 559 μV zusehen ist. Bei 50 Hertz nehmen die Flimmerwellen an Größe ab und verschmelzen bei 60 Hertz.

3. Initiale Antworten

Über die initialen Antworten ist nichts wesentliches zu berichten. Sie gleichen in der Form denen bei HA. Die Amplitudenhöhe ist geringfügig vergrößert, steht also in annähernd relativem Verhältnis zu der Zunahme der Flimmerwellenamplitude, ist aber im Vergleich zu dieser gering.

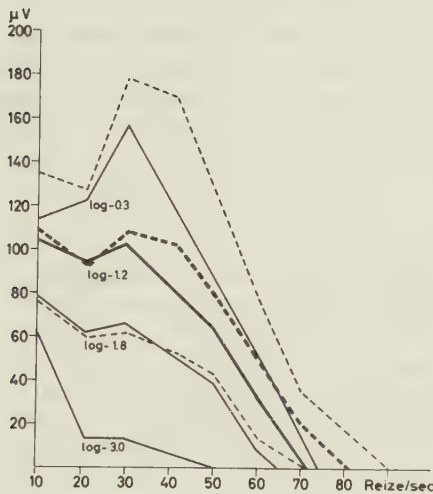


Abb. 20

Amplitude der Flimmerwellen in μV bei Reizung mit verschiedenen Intensitäten bei HA und DA im Vergleich. Die ausgezogenen Linien bedeuten DA, die gestrichelten HA. Bei den stärkeren Lichtintensitäten wird das Überwiegen der Flimmerwellenamplitude bei HA deutlich, während unterhalb von Intensität $\log-1,8$ die DA größere Ausschläge hervorruft. Bei $\log-3,0$ und HA konnten überhaupt keine meßbaren Ausschläge registriert werden.

VI. Statistik der Mittelwertsdifferenz

P = Propabilitas gilt als Kriterium der Wahrscheinlichkeit, daß die gefundenen Mittelwerte beider Meßreihen bei DA und HA nicht auf Zufall beruhen. Durch Übereinkunft hat man festgelegt, daß die Differenz zweier Mittelwerte bei biologischen Messungen dann als signifikant angesehen werden soll, wenn $p \leq 0,05$ ist.

1. Vergleich der Flimmerwellenamplituden

Die Unterschiede der Flimmerwellenamplitude bei HA und DA können im großen und ganzen als statistisch signifikant angesehen werden, wenn auch einzelne Werte ein größeres p als 0,05 aufweisen. Dies ist besonders bei 22 Reizen/sec. der Fall (s. Tabelle 13).

Tabelle 13 A

Hertz	-3,0	-1,8	-1,2	-0,9	-0,3	0 log rel. Int.
10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
22	<0,001	0,01	0,15	0,45	<0,001	0,21
30	<0,001	<0,001	<0,001	0,10	<0,001	<0,001
50	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
60	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Tabelle 13 B

Hertz	640	614	584	559	540	504	468 mp
10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
22	<0,001	<0,001	0,45	0,001	0,1	<0,001	<0,001
30	<0,001	<0,001	0,05	0,15	0,001	0,001	<0,001
50	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Tabelle 13 enthält die p-Werte der Flimmerwellenamplituden bei Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten (Tab. 13 A) und monochromatischem Licht verschiedener Wellenlänge (Tab. 13 B).

2. Vergleich der Amplitude der initialen Antworten

Die initialen Antworten, die dem Einfluß der Adaptation stärker unterliegen als die Flimmerwellen, weisen durchweg eine höhere Signifikanz auf. p liegt hier immer unter 0,001. Wir haben aus diesem Grunde auf eine Tabelle verzichtet.

Diskussion

Besprechung der Ergebnisse

An Hand der aufgeführten Ergebnisse wird deutlich, daß zwischen den Flimmer-ERG bei DA und HA ein deutlicher Unterschied besteht, der die Amplitudenhöhe der initialen Antworten und der Flimmerwellen, ihre Gestalt und die FVF betrifft, obwohl es sich in beiden Fällen im wesentlichen um den Vergleich zweier photopischer ERG handelt. Da die Intensität und die Reizfrequenz der beiden Versuchsgruppen gleich waren, müssen alle gefundenen Unterschiede allein auf dem Einfluß der Adaptation bzw. der Raumbeleuchtung während des Versuches beruhen.

Die statistische Auswertung der Amplitudenhöhe der Initial- und Flimmerwellen ergab einen statistisch signifikanten Unterschied der entsprechenden Mittelwerte bei DA und HA, wodurch die aufgestellte Behauptung bewiesen werden kann.

1. a) Einfluß der Adaptation auf die Amplitude der Flimmerwellen

Zunächst möchten wir auf den Einfluß der Adaptation im Hinblick auf die Amplitude der Flimmerwellen eingehen, und zwar bei Reizung mit verschiedenen Lichtintensitäten, wie sie die Abb. 20 noch einmal zusammenfassend veranschaulicht. Dort, wo wir die skotopischen Flimmerwellen bei DA beobachten, wird bei HA überhaupt noch kein ERG ausgelöst, da die Raumbeleuchtung zur Reizintensität zu groß ist. Dies steht in Parallelität zu den Versuchen von DODT und HECK (1954), die bei Reizung mit skotopischen Intensitäten auch nur bei DA Ausschläge registrierten, weil dabei die Stäbchen nicht gehemmt sind. Bei der Intensität $\log -1,8$ (Abb. 20) zeigen die Flimmerwellen bei HA ein ähnliches Verhalten in ihrer Amplitude wie bei DA. Hier halten sich DA und HA betreffs der Amplitude der Flimmerwellen die Waage. Bei den

höheren Intensitäten überwiegen dann die Flimmerwellen der Hell-adaptierten an Größe, erst gering und dann immer beträchtlicher. Dem entspricht das Ansteigen der FVF auf Werte zwischen 80 und 93 Hertz, während die entsprechenden bei DA zwischen 65 und 76 Hertz liegen. Die HA wirkt also wie die Intensität im Sinne einer Vergrößerung der Amplitude mit Erhöhung der FVF.

Die Flimmerwellen der farbsensitiven ERG, deren Reizintensität zwischen den Intensitäten $\log-3,0$ und $\log-1,8$ liegt, verhalten sich in ihrer Amplitude entsprechend, denn bei DA sind die Flimmerwellen größer als bei HA, wo sie durchweg klein erscheinen. Es ist demzufolge nicht nur die Adaptation von Bedeutung für die Flimmerwellengröße, sondern auch die Intensität, oder vielmehr das Verhältnis von Adaptation bzw. Raumbelichtung zur Reizlichtstärke. Unterhalb einer gewissen Intensität, hier $\log-1,8$, bewirkt die HA keinen Anstieg der Amplitude mehr, sondern einen Abfall, weil die Reizintensität gemessen an der Raumbelichtung zu schwach ist, um die Retina optimal zu erregen.

Mithin muß deswegen das Verhältnis von Reizlicht und Raumbelichtung bei mesopischer Adaptation am günstigsten sein. In der Tat konnten wir bei diffuser Raumbelichtung die höchsten Amplituden verzeichnen, wie sie auch bei HA nicht zu beobachten waren. Die Amplitudenzunahme erstreckte sich auch auf die schwachen Intensitäten und die Farblichtreizung.

b) Frequenzabhängigkeit der Flimmerwellenamplitude

Wie die Intensität, so bestimmen auch die Frequenz und die Wellenlänge die Amplitude der Flimmerwellen. Bei den niedrigen Intensitäten bis $\log-1,2$ fallen die Flimmerwellen von dem relativ kleinen Wert bei

10 Hertz mehr oder weniger stark ab, um ein Minimum bei 22 Hertz zu erreichen und dann wieder zu dem Maximum bei 30 Hertz anzusteigen, daß dies Maximum bei den niedrigsten Intensitäten das Minimum bei 22 Reizen/sec. kaum übersteigt. Es ist nach dem vorher erwähnten klar, daß dieses Verhalten für die Farblichtreizung und deren Amplituden in Bezug auf die Frequenzabhängigkeit ebenso zutrifft. Die höchsten Amplituden treffen wir hier bei 10 Hertz und DA. Auch der Abfall zu dem Minimum bei 22 Hertz ist hier am stärksten im Gegensatz zu den niedrigen Werten und dem sanfteren Abfall bei HA, bei der 10, 22 und 30 Hertz die Amplitudenhöhe nicht modifizieren, sondern dieselbe auf der gleichen Höhe stagniert. Erst bei Intensitäten oberhalb $\log -1,2$, also ab $\log -0,9$ liegt das Maximum der Amplituden oberhalb des Ausgangswertes von 10 Hertz. Die höheren Intensitäten bei DA weisen überhaupt kein Minimum in dem Sinne mehr auf, sondern sie steigen kontinuierlich bis zu 30 Reizen/sec. hin an, was bei HA nur bei $\log 0$ der Fall ist, welches dort wohl auf die Suppression der Flimmerwellen bei 10 Hertz zurückzuführen ist. Eine weitere Besonderheit bei $\log 0$ und HA ist, daß erst bei 42 Reizen/sec. das Maximum an Amplitude erreicht wird. Der Abfall der Flimmerwellen erfolgt bei beiden Adaptationszuständen ungefähr gleich, bei HA etwas verzögert, so daß die FVF hier höher liegt, was die Reizung mit verschiedenen Intensitäten sowie die Farblichtreizung gleichermaßen betrifft. Die Raumbelichtung hat trotz des helladaptierenden Effektes der Flimmerreizung einen entscheidenden Einfluß.

Die Wellenlänge wirkt sich derart auf die Amplitude der Flimmerwellen aus, daß ein Maximum bei 560 bis 540 m μ entsteht unabhängig von der Frequenz. Ein Unterschied zwischen HA und DA besteht nur in der Amplitudenhöhe, nicht aber in Bezug auf die Wellenlänge. Der helladaptierende Effekt der Flimmerreizung ist hier also so stark, daß die dunkle Zwischenbeleuchtung

keine eigentliche DA hervorzurufen vermag und das Maximum bei DA dem bei HA gleicht.

Die FVF unterliegt insofern der Wellenlänge, als die mittleren Wellenlängenbereiche zuletzt verschmelzen.

Es ist nur im beschränkten Umfang möglich, die eigenen Ergebnisse mit denen von HECK (1957a) und BORNSCHEIN und LAHODA (1960) zu vergleichen, da von HECK die genauen Adaptationsbedingungen nicht angegeben werden. BORNSCHEIN und LAHODA begannen ihre Flimmerreizung nach einer helladaptierenden Flimmerserie. Bei beiden Autoren ist unklar, bei welcher Raumbeleuchtung die Versuche unternommen wurden.

Im großen und ganzen stimmen die eigenen Ergebnisse jedoch mit denen von HECK und BORNSCHEIN und LAHODA überein. Sie setzen das Maximum der Flimmerwellen bei 10-15 Hertz (HECK) und 9-14 Hertz (BORNSCHEIN und LAHODA) fest. Hierzu kann keine Stellung genommen werden, da wir nur bei 10 und 22 Hertz Aufnahmen machten. Unser Minimum liegt, wie erwähnt, bei 22 Hertz. Das Maximum liegt bei den Versuchen von HECK und BORNSCHEIN und LAHODA oberhalb von 30 Hertz, was den eigenen Ergebnissen entspricht. Die Intensitäten unter 250 Lux haben jedoch alle ihr Maximum bei 30 Hertz (HECK), nur 250 Lux, die höchste von HECK beschriebene Intensität, weist das Maximum bei 40 Hertz auf. Dies bildet eine Parallele zu dem von uns gefundenen einzigen Maximum bei 42 Reizen/sec. und HA bei log 0 (420 Lux). Außerdem muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die eigenen Versuche an einem größeren Personenmaterial vorgenommen wurden und daher eine größere statistische Genauigkeit haben. Das Maximum an Amplitudenhöhe der Flimmerwellen beträgt bei HECK sowohl als auch bei BORNSCHEIN und LAHODA 180 bis 190 μ V, was den von uns gefundenen Werten bei HA gleichkäme.

c) Einfluß der Adaptation auf die Flimmerwellenform

Das Kriterium des unterschiedlichen Verhaltens bei DA und HA müssen wir in der jeweiligen Form der Flimmerwellen suchen.

Bei 10 Reizen/sec. nach 5 min. DA haben die Flimmerwellen bei $\log -3,0$ ein skotopisches Aussehen, während bei HA überhaupt keine Ausschläge erscheinen. Bei den höheren Intensitäten treffen wir in beiden Fällen nur noch photopische Flimmerwellen an. Der off-Effekt ist bei HA sofort vorhanden und besteht wie bei HECK aus zwei positiven Schwankungen, während bei DA nur ein positiver off-Effekt erscheint, und zwar erst bei den stärkeren Intensitäten ab $\log -0,9$. Der off-Effekt ist hier auch längst nicht so hoch wie bei HA, deswegen wurde in früheren Arbeiten von BORNSCHEIN und SCHUBERT (1953) zuerst nur das Vorhandensein eines off-Effektes beschrieben. Das gleiche gilt für die Farblichtreizung, doch erscheint der off-Effekt hier nur bei den mittleren Wellenlängen mit einem Maximum bei 540-559 m μ , da jenseits dieser Wellenlängen insbesondere bei 640, 614 und 468 m μ mesopische Tendenzen das Bild bestimmen. Die höchste Amplitude des off-Effektes fanden wir bei mesopischer Adaptation, die, wie vorher beschrieben, auch mit einer maximal hohen Amplitude der Flimmerwellen einhergeht. Die Höhe und Ausprägung des off-Effektes ist ein ebenso guter Indikator wie die Flimmerwellenamplitude für die maximale Erregung der Retina, die offenbar bei diffuser Raumbeleuchtung am optimalsten ist, während sie bei voller HA schon durch Hemmechanismen beeinflusst wird. Diese treten auch bei den starken Intensitäten $\log -0,3$ und $\log 0$ bei 10 Hertz in Aktion, sowohl bei HA als auch bei DA und sind auf den BRÜCKE-BARTLEY-Effekt zurückzuführen.

Jenes negative Flimmern, das wir hier fanden, könnte in Anlehnung an die Ausführungen von GRANIT (1935, 1958) die Duplizität der menschlichen Retina deutlich machen, die bei diesen Intensitäten zum I-Typ zu gehören scheint, da die negativen a-Wellen überwiegen. Das Phänomen der Unterdrückung der x-Welle, oder vielmehr der stärkeren Zunahme der a-Welle wird

aber nicht bei allen Kurven beobachtet, sondern bei manchen bleiben die Flimmerwellen positiv, d.h. über der Basislinie, obwohl ihre Größe nicht zunimmt. Man könnte so auch an eine Unterteilung der menschlichen Netzhäute in E- und I-Typen denken, zumal die off-Effekte auch besonders hoch sind.

Bei den höheren Frequenzen überlagern sich on- und off-Effekt zu diphasischen Flimmerwellen mit steilem Anstieg und etwas verzögertem Abfall. Der sanft abfallende Schenkel enthält wahrscheinlich Komponenten des off-Effektes.

Bei 30 Hertz und HA sind einige Besonderheiten zu berichten. Den hohen, positiven Gipfeln folgt nämlich ein deutliches kleines Potential im absteigenden Schenkel, das bei den stärkeren Intensitäten besonders ausgeprägt ist. Sein Vorkommen wurde bisher nicht beschrieben. Es wurde vielmehr von BORNSCHEIN und SCHUBERT (1953), GOODMAN und ISER (1956) die Ansicht vertreten, daß sich bei 30 Hertz on- und off-Effekt in einem maximal großen Ausschlag superponierten. Es ist schwierig zu sagen, wie diese beiden Potentiale einzuordnen sind, doch scheint es, als ob das erste, spitze Gipfelpotential die x-Welle und der nachfolgende Buckel der off-Effekt sei. Doch ist es auch möglich, daß ein Teil des off-Effektes in dem Gipfelpotential steckt und der Buckel den anderen Teil darstellt, doch kann von einer idealen Superposition bei HA nicht die Rede sein, wenngleich bei DA eine solche wohl zu verzeichnen ist.

d) alternierendes Flimmern als Ausdruck der Adaptation

Bei 42 und 50 Hertz wird der Einfluß der HA auf die Form der Flimmerwellen noch einmal besonders deutlich. Wir finden hier verschiedene Flimmertypen. Die Flimmerwellen tragen nun ein kleines in den aufsteigenden Schenkel eingebautes Potential, was allen beschriebenen Flimmertypen gemeinsam ist; darauf folgt ein schnelles, positives Potential, das der beschriebenen Grundschwingung aufgesetzt scheint. Da der off-Effekt

nach HECK (1957 b) bei den kurzen Lichtblitzen an Größe zunimmt, könnte das schnelle Gipfelpotential diesen verkörpern und das kleine Potential im aufsteigenden Schenkel Reste des on-Effektes, der x-Welle, darstellen. BEST und BOHNEN (1957 a u. b.) erklärten das alternierende Flimmern mit dem verzögerten Auftreten jedes zweiten, positiven off-Effektes und dessen verschieden starker Beschneidung durch die folgende, negative a-Welle. Die Aufnahme in Abb. 12, 50 Hertz log o legt aber den Schluß nahe, daß der amplitudenreduzierende Faktor vor dem eigentlichen Gipfel der Flimmerwellen liegt, nämlich bei dem kleinen Potential das wir vorher auf die x-Welle zurückführten. Da es einmal hoch, einmal tief sitzt, wäre seine Höhe also ausschlaggebend für die Amplitude. Entweder wird nun jeder zweite on-Effekt verzögert oder abgeschwächt wiedergegeben, oder aber in der "Grundschiwingung" ist schon ein Teil des off-Effektes, von dem jeder zweite verlangsamt eintrifft, enthalten. Wir müßten es demzufolge mit drei Komponenten des off-Effektes zu tun haben, da der eigentliche zweite off-Effekt und auch die x-Welle nach HECKs Auffassung bei diesen hohen Frequenzen wegen ihrer großen Latenz unterdrückt werden. Nur die schnelle a-Welle und der erste, positive off-Effekt sollen die Flimmerwellen bilden. Von BEST und BOHNEN (1957a) wurde in anderem Zusammenhang ebenfalls schon diskutiert, ob der off-Effekt nicht auch möglicherweise aus drei positiven Potentialen bestehe. Eine endgültige Beantwortung dieser Fragen kann hier nicht gegeben werden.

Ein ausgesprochen deutliches alternierendes Flimmern, wie es von BEST und BOHNEN demonstriert wurde, stellen wir bei diffuser Raumbeleuchtung fest. Selbst bei farbsensitiven Aufnahmen bei 42 Hertz und 559 m μ konnten wir alternierende Flimmerpotentiale erkennen, was bei HA und schon gar bei DA nie vorkam. Da wir bei

indifferenter Beleuchtung auch in den bei 22 Hertz gemachten Aufnahmen überaus deutliche off-Effekte feststellten, steht die Form und Größe der anfänglichen off-Effekte in zwingender Beziehung zur adaptiven Beleuchtung und diese wiederum zum alternierenden Flimmern. Das alternierende Flimmern ist also nicht so sehr eine Frage der Intensität, wie BEST und BOHNEN (1957a) erklärten, sondern vielmehr der Adaptation, abgesehen natürlich von der Frequenz, die ja erst die algebraische Überdeckung der einzelnen Phasen bewirkt. Bei den höheren Frequenzen ab 60 Hertz unterscheiden sich die Flimmerwellen bei HA und DA nurmehr in ihrer Amplitude, nicht aber ihrer Form. Nach HECK (1957a) setzten sie sich aus a-Welle und dem ersten positiven off-Effekt zusammen.

2. a) Einfluß der Adaptation auf die Amplitude der initialen Antworten

Naturgemäß unterliegen die initialen Antworten der Adaptation bzw. der Raumbelichtung in noch größerem Maße wie die nachfolgenden Flimmerwellen. Schon von BEST und BOHNEN (1957a) wurde beschrieben, daß mäßige HA die größten a- und b-Wellen entstehen ließe, während völlige DA kleinere und HA die kleinsten auslöse. Daß das Verhalten der initialen Antworten mithin nicht mit dem der Flimmerwellen konform geht, ist augenscheinlich. Wir können die Befunde von BEST und BOHNEN (1957a) bestätigen.

Bei DA, die durch die dauernd einsetzende Flimmerreizung beinahe einer mesopischen Adaptation gleich kommt, treffen wir die größten Ausschläge sowohl bei den a-Wellen, die gedoppelt sind, zuerst beobachtet von ARMINGTON, JOHNSON und RIGGS (1952), an, als auch bei den positiven Initialwellen. Sie sind zum Teil so groß, daß sie nicht registriert werden konnten. Während die Abhängigkeit der a-Wellen von der Intensität offenkundig ist, bleibt der Einfluß der Frequenz

fraglich. Man könnte dies nur bei 10, 22 und 30 Hertz konstatieren, sowohl auf a- wie auf x-Wellen bezogen, wo ein Abfall der Wellen erfolgt. Bei hoher Frequenz sistiert die Amplitude und pendelt im Sinne einer Einzelblitzantwort, auf die die Blitzlänge keinen Einfluß mehr zu haben scheint, hin und her. Im Gegensatz hierzu haben die viel kleineren x-Wellen bei HA ein Maximum bei 30 Reizen/sec. und gleichen in dieser Beziehung den Flimmerwellen, sowie auch in ihrer Amplitudenhöhe. Auch sie behalten nach diesem Gipfel eine feste Größe bei. Das Erscheinen dieser autonomen Einzelblitzantwort wurde auch schon von GOODMAN und ISER (1956) beschrieben, doch nur im Hinblick auf die Form. Die a-Wellen bei HA sind vollkommen unabhängig von der Frequenz, sie unterliegen nur der Intensität.

Charakteristisch ist die Amplitudenzunahme der initialen Wellen bei DA und Farblichtreizung. Sie nehmen vom langwelligen Bereich zu Beginn der Flimmerreizung, wo sie noch aus b-Wellen bestehen, ständig an Größe zu und die positiven dann folgenden x-Gipfel erreichen gleich hohe Werte wie die starken Intensitäten bei DA, obwohl dies gar nicht der schwachen Intensität der Farblichtreizung entspricht. Dieses allein farbspezifische Verhalten, bei dem das Maximum an Amplitude bei 504 μ liegt, ist der DA, die aber eigenartigerweise nur die initialen Wellen betrifft, die nach einer kurzen DA ausgelöst werden, zuzuschreiben. Es widersprechen sich hier die Maxima der initialen Wellen und der Flimmerwellen (559-540 μ). Der Anstieg der initialen Wellen entspricht also mehr dem Einfluß der DA und der Wellenlänge. Bei völliger DA liegt das Maximum der initialen Antworten bei 500 μ (ADRIAN, 1945), was den von uns gefundenen Maxima bei 504 μ entsprechen würde. Es handelt sich dort um skotopische b-Wellen, die in unseren Versuchen durch x-Wellen vertreten werden. Nur die ersten beiden Aufnahmen weisen b-Wellen auf (640, 614 μ).

b) Einfluß der Adaptation auf die Form der initialen Antworten

Die Form der initialen Antworten bei HA und DA weist keine großen Unterschiede auf. Nur ist bei DA und Reizung mit verschiedenen Intensitäten die erste Antwort nach 5 min. DA skotopischer Natur, doch die folgenden Aufnahmen zeigen schon ein photopisches Aussehen. Sonst treffen wir nur bei Farblichtreizung bei 640 und 614 m μ runde b-Wellen, doch pflanzen sich hier insbesondere bei ansteigender Frequenz der Reizfrequenz entsprechende x-Gipfel auf, so daß schließlich x-Wellen daraus werden.

3. Zusammenfassende Bemerkungen

Abschließend können wir sagen, daß es uns gelungen ist, einen Unterschied in der Höhe der Flimmer-ERG-Wellen zwischen DA und HA festzustellen, der eine statistische Signifikanz zeigt.

Die Flimmerwellenamplitude ist bei DA am geringsten. Sie steigt dann allmählich an, um bei diffuser Raumbelichtung ein Maximum zu erreichen, sie fällt darauf wieder etwas ab. Doch liegen die Flimmerwellen der bei HA gemachten Versuche trotzdem noch weit über denen bei DA. Gleichzeitig geht das Stadium des Flimmerwellenmaximums bei offenbar optimaler Beleuchtung mit einem off-Effekt einher, der aus mindestens zwei Komponenten besteht und der auch verantwortlich ist für das polymorphe Aussehen der Flimmerwellen im Bereich von 40 bis 50 Hertz, vereinzelt auch 60 Hertz. Im Gegensatz zu der Meinung von BEST und BÖHNEN (1957a) ist nicht nur die Intensität für das alternierende Flimmern verantwortlich, sondern in viel entscheidenderem Maße der

Adaptationszustand! Das Maximum an Amplitude bei den initialen Antworten liegt dagegen bei DA, von wo aus ihre Größe ständig abnimmt, bis sie bei HA unter der der nachfolgenden Flimmerwellen liegt.

Zusammenfassung

Das Flimmer-ERG ermöglicht im Gegensatz zum Einzelblitz-ERG die Registrierung zahlreicher Reizantworten pro Zeiteinheit. In den dargestellten Versuchen an je 25 augengesunden Versuchspersonen wird der Einfluß der Dunkel- und der Helladaptation auf die Höhe der Flimmer-ERG-Potentiale analysiert, ebenso ihre Abhängigkeit von der Reizintensität, der Reizfrequenz und der Wellenlänge. Die Bestimmung der initialen Antworten und der nachfolgenden Flimmerwellen erlaubt die Darstellung der Unterschiede bei Helladaptation und kürzester Dunkeladaptation.

Folgende Unterschiede in der Amplitudenhöhe der ERG - Potentiale, die sich auch statistisch sichern ließen, wurden festgestellt:

1. Die Flimmerwellen bei Dunkeladaptation und Flimmerreizung mit verschiedenen Lichtintensitäten liegen in ihrer Größe unter denjenigen bei Helladaptation, zumindestens im Bereich der photopischen Intensitäten. Die höchsten Flimmerwellen finden sich jedoch bei mesopischer Adaptation.
2. Ein umgekehrtes Verhältnis besteht bei den Initialwellen, die bei Dunkeladaptation eine viel höhere Amplitude aufweisen als bei Helladaptation, was auch für die Initialwellen bei Farblichtreizung und die Flimmerwellen zutrifft.
3. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit der Flimmerwellen bei Farblichtreizung ist bei beiden Versuchsgruppen gleich, nämlich bei 559 - 540 m μ .
4. Die Verschmelzung der Flimmerwellen bei Reizung mit verschiedenen Intensitäten liegt bei Helladaptation zwischen 80 und 93, bei Dunkeladaptation zwischen 65 und 76 Hertz. Die Flimmerverschmelzungsfrequenz bei Farblichtreizung beginnt bei Helladaptation bei 60, bei Dunkeladaptation bei 50 Reizen/sec..

Hinsichtlich der Unterschiede in der Form der ERG - Potentiale zeigte sich folgendes:

1. In der Form verschiedene Potentiale finden sich nur am Anfang der Dunkeladaptation, d.h. nach 5 min. völliger Dunkeladaptation. Die Potentiale haben hier skotopischen Charakter. Bei ansteigender Intensität lassen sich nur noch photopische Potentialformen nachweisen.
2. Im Bereich starker Intensitäten bei 10 Hertz ergab sich sowohl bei Hell- als auch bei Dunkeladaptation eine Suppression der ERG-Potentiale und ein "negatives Flimmern" mit Überwiegen der a-Wellen und relativer Abnahme der x-Wellen.
3. Der "off-Effekt" bei 10 Hertz besteht bei Helladaptation aus einer hohen ersten und einer kleinen zweiten Schwankung, bei Dunkeladaptation dagegen nur aus einer wesentlich niedrigeren positiven Erhebung.
4. Diesem Phänomen geht das Verhalten der Flimmerwellen bei Helladaptation, insbesondere bei hohen Intensitäten im Bereich von 40 bis 60 Hertz, parallel. Man begegnet hier verschiedenen Flimmertypen, z.B. einem alternierenden Flimmern oder Flimmerwellen, denen kleine Potentiale im aufsteigenden Schenkel eingelagert sind. Sie sitzen hier an verschiedenen Stellen und trennen die langsame "Grundschwungung" von den schnellen ihr aufgesetzten spitzen positiven Gipfeln. Sie sind unter Umständen für das alternierende Flimmern verantwortlich.
5. Bei Dunkeladaptation konnten wir nie ein alternierendes Flimmern und ein so komplexes Aussehen der Flimmerwellen feststellen wie es bei Helladaptation und vor allem bei mesopischer Adaptation der Fall war. Dies hängt offenbar mit der geringen Höhe des off-Effektes zusammen.
6. Nicht nur die Intensität ist somit für das alternierende Flimmern und die Form der Flimmerwellen verantwortlich. Eine größere Rolle spielt dafür der Adaptationszustand, abgesehen selbstverständlich von der Frequenz, die ja erst die für das Flimmer-ERG charakteristischen Überdeckungen der Einzelblitzkomponenten hervorruft.

Literaturverzeichnis

- ADRIAN, E. : The Elektric Response Of The Human Eye.
J. Physiol., 104, 84-104 (1954)
- ADRIAN, E. : Rod And Cone Components In The Elektric Response Of The Human Eye.
J. Physiol., 105, 24-37 (1946)
- ARDEN, G., GRANIT, R. u. PONTE, F. :
Phase Of Suppression Following Each Retinal
b-Wave In Flicker.
J. Neurophysiol.(Springf.Ill.),23,305-314 (1960)
- ARMINGTON, J. C. :
A Component Of The Human Elektroretinogram
Associated With Red Color Vision.
J. Opt. Soc. Am., 42, 393-401 (1952)
- ARMINGTON, J. C. :
Amplitude Of Response And Relative Spectral
Sensivity Of The Human ERG.
J. Opt. Soc. Am., 45, 1058-1064 (1955)
- ARMINGTON, J.C., JOHNSON, E.P. u.RIGGS, L.A.:
The Skotopic a-Wave In The Elektrical Response
Of The Human Retina.
J. Physiol., 118, 289-298 (1952)
- ARMINGTON, J.C., TEPAS, D.J., KROPEL, W.J. u. HENGST, W.H. :
Summation Of Retinal Potentials.
J. Opt. Soc. Am., 51, 877-886 (1961)
- BARTLEY, S. H. :
Action Potentials Of The Optic Cortex Under
The Influence Of Strychnine.
Am. J. Physiol., 103, 203-212 (1933)
- BARTLEY, S. H. :
Temporal And Spatial Summation Of Peripheral
Impulses With Activity Of The Brain.
Am. J. Physiol., 116, 8 (1936)

BARTLEY, S.H. :

Some Observations On The Organisation Of The
Retinal Response.

Am. J. Physiol., 120, 184-189 (1937)

BAYNTON, R.M., STURR, J.F., IKEDA, M. :

Study Of Flicker By Increment Threshold
Technique.

J. Opt. Soc. Am., 51, 196-201 (1961)

BERNHARD, C. : Loc. Zit. : STRAUB : Elektoretinogramm,
Springer Verlag (1960)

BEST, W. : Das menschliche Elektoretinogramm während
der Dunkeladaptation.

Acta Ophthalm., 31, 95-116 (1953)

BEST u. BOHNEN, K. :

a) Untersuchungen über das ERG bei Verwendung
farbiger Lichtreize.

Bibl. Ophthalm., 48, 77-86 (1957)

BEST u. BOHNEN K. :

b) Alternierende Potentiale im ERG des Menschen
bei Flimmerbelichtung.

Acta Ophthalm. (Kbh.), 35, 273-278 (1957)

BORNSCHEIN, H. :

Der Einfluß von Adaptationszustand und Reiz-
intensität auf die Komponenten des menschlichen
Elektoretinogramms.

Zschr. f. Biol., 105, 454-463 (1953)

BORNSCHEIN, H. :

Der Einfluß der Reizfrequenz auf die Über-
lebenszeit des skotopischen ERG.

Pflügers Arch., 270, 184-194 (1959)

BORNSCHEIN, H. :

Physiologische Aspekte des Flimmer-ERGs :
Komponenten und Frequenzcharakteristik.

Docum. Ophthalm., 18, 85-100 (1964)

BORNSCHEIN, H. u. GOODMAN, G. :

Studies Of The a-Wave In The Human Elektroretinogram.

Arch. Ophthalm., 58, 431-437 (1957)

BORNSCHEIN, H. u. LAHODA, R. :

Harmonic Analysis Of Human Flicker Elektroretinogram.

Proc. 3rd Int. Conf. Med. Elektronics,
342-344 (1960)

BORNSCHEIN, H. u. SCHUBERT, G. :

Das photopische Flimmerelektroretinogramm
des Menschen.

Zschr. f. Biol., 106, 229-238 (1953)

BRINDLEY, G.S. :

Beats Produced By Simultaneous Stimulation
Of The Human Eye With Intermittent Light
And Intermittent Or Alternating Elektric
Current.

J. Physiol., 164, 157-167 (1962)

BURIAN, H.M. u. SPIVEY, B.E. :

The Effekt Of TWIN Flashes And Of Repetitive
Light Stimuli On The Elektroretinogram.

Am. J. Ophthalm. 84/2, 274-286 (1959)

COBB, W. u. MORTON, H.B. :

The Human Retinogram In Response To High
Intensity Flashes.

EEG Clin. Neurophysiol., 4, 547-556 (1952)

COOPER, S., CREED, R. u. GRANIT, R. :

A Note On The Retinal Action Potential Of
The Human Eye.

J. Physiol., 79, 185-190 (1933)

CRAMPTON, G. u. ARMINGTON, J. :

Area Intensity And Retinal Location In The
Human Elektroretinogram.

Am J. Physiol., 181, 53-47 (1955)

- CREED, R. u. GRANIT, R. :
Observations On The Retinal Action Potential
With Especial Reference To The Response To
Intermittent Stimulation.
J. Physiol., 78, 419-441 (1933)
- DAY, E.C. : Photoelektrische Ströme im Auge des Fisches.
Am. J. Physiol., 38, 369-398 (1915)
- DENDEN, A.: Flimmererelektroretinogramm und photopische
Spektralsensitivität bei der Deuteranopie
(Typ I und II Willmer).
Ber. dtsh.ophthalm. Ges., 363-367 (1962)
- DEWAR, J. u. MC.KENDRICK, J.G. :
Loc. Zit. : STRAUB, W. : Elektroretinogramm,
Springer Verlag (1960)
- EINTHOVEN, W. u. JOLLY, W. :
Loc. Zit. : STRAUB, W. : Elektroretinogramm,
Springer Verlag (1960)
- DODT, E. : Über die sekundäre Erhebung im Aktions-
potential des menschlichen Auges bei
Belichtung.
Albrecht v.Graefes Arch.Ophthalm., 151, 672-
692 (1951)
- DODT, E. : Cone Elektroretinography By Flicker.
Nature (Lond.), 168, 738 (1951)
- DODT, E. : Über die Grundvoraussetzungen der Duplizitäts-
lehre des Sehens.
Naturwissensch., 49, 530-533 (1962)
- DODT, E., ECHTE, K. u. JESSEN, K.H. :
Elektroretinographische Messungen der Unter-
schiedsschwelle bei Steigerung der adaptiven
Beleuchtung.
Ber. dtsh. ophthalm. Ges., 319-322 (1961)

- DODT, E. u. HECK, J. :
Einflüsse des Adaptationszustandes auf die
Reception intermittierender Lichtreize.
Pflügers Arch., 259, 212-225 (1954)
- DODT, E. u. WADENSTEN, L. :
The Use Of Flicker Elektroretinographie In
The Human Eye.
Acta Ophthalm.(Kbh.), 32, 165-180 (1954)
- FAURE, J., CHABOT, J. u. DUTERTRE, F. :
Loc. Zit.: STRAUB, W. : Elektroretinogramm,
Springer Verlag (1960)
- FRANÇOIS, J. u. DE ROUCK, A. :
The Use Of Flashes In Elektroretinography.
Am. J. Ophthalm., 54, 54-63 (1962)
- FRY, G.A. u. BARTLEY, S.H. :
The Relation Of Stray Light In The Eye To
The Retinal Action Potential.
Am. J. Physiol., 111, 335-340 (1955)
- GEIGY, I.R. : Documenta Geigy, wissenschaftliche Tabellen.
I.R. GEIGY AG Basel, Pharm.Abteilung, (1957)
- GOODMAN, G. u. ISER, G. :
Physiologic Studies With Flicker Elektro-
retinography.
Am. J. Ophthalm. Ser.3, Part II, 42, 212-226
(1956)
- GRANIT, R. : Isolation Of Components In The Retinal Action
Potential Of The Decerebrate Dark Adapted
Cat.
J. Physiol., 76, 1 (1932)
- GRANIT, R. : The Components Of The Retinal Action Potential
In Mammals And Their Relation To The Discharge
In The Optic Nerve.
J. Physiol., 77, 207-239 (1933)

- GRANIT, R. : Two Types Of Retinae And Their Elektrical Responses To Intermittend Stimuli In Light And Dark Adaptation.
J. Physiol., 85, 421-438 (1935)
- GRANIT, R. : Sensory Mechanisms Of The Retina.
New York: Oxford University Press (1947)
- GRANIT, R. : Physiological Basis Of Flicker Elektroretinography As Applied In Clinical Work.
Ophthalmologica (Basel), 135, 327-348 (1958)
- GRANIT, R. u. RIDDELL, L.A. :
The Elektric Responses Of Light And Dark Adapted Frog's Eyes To Rhythmic And Continous Stimuli.
J. Physiol., 81, 1-28 (1934)
- GRANIT, R. u. THERMAN, P.O. :
Excitation And Inhibition In The Retina And In The Optic Nerve.
J. Physiol., 83, 359-381 (1935)
- HECK, J. : a) The Flicker Elektretinogram Of The Human Eye.
Acta Physiol. scand., 39, 158-166 (1957)
- HECK, J. : b) Der off-Effekt im menschlichen Elektretinogramm.
Acta Physiol. scand., 40, Fasc. 2-3 (1957)
- HENKRS, H.E., VAN DER TWEEL, L.H. u. VAN DER GON, D.J.J. :
Selektive Amplification Of The Elektretinogram.
Ophthalmologica (Basel), 132, 140-150 (1956)
- HORSTEN, G.P.M. u. WINKELMAN, J.E. :
Une nouvelle méthode d'investigation électro-rétinographique pour déterminer la sensibilité de la rétine.
Ann. Oculist. (Paris), 189, 165-173 (1956)

HOWARTH, C.J. :

On-Off Interaction In The Human Elektroretinogram.

J. Opt. Soc. Am., 51, 345-352 (1961)

ISER, G. u. GOODMAN, G. :

Clinical Studies With Flicker Elektroretinography.

Am. J. Ophthalm. Ser.3, Part II, 42, 227-238 (1956)

JACOBSON, J.H., STEPHENS, G., SUZUKI, T. :

Computer Analysis Of The Elektroretinogram.

Acta Ophthalm. (Kbh.), 40, 313-319 (1962)

KARPE, G. : The Basis Of Clinical Elektroretinography.

Acta Ophthalm. (Kbh.), Suppl. 24,1 (1945)

KARPE, G. u. TANSLEY, K. :

The Relationship Between The Change In The Elektroretinogram And The Subjektive Dark-Adaptation Curve.

J. Physiol., 107, 272-279 (1948)

KOHLRAUSCH, A. :

Der Verlauf der Netzhautströme und der Gesichtsempfindungen nach Momentbelichtung. Pflügers Arch., 209, 607 (1925)

KÜHNE, W. u. STEINER, J. :

Über das elektromotorische Verhalten der Netzhaut.

Untersuch. Physiol. Inst. Univ. Heidelberg, 3, 327-377 (1880)

MAHNEKE, A. : Elektroretinography With Double Flashes.

Acta ophthalm. (Kbh.), 35, 131-141 (1957)

MOTOKAWA, K. u. MITA, T. :

Über die einfachere Untersuchungsmethode und Eigenschaften der Aktionsströme der Netzhaut des Menschen.

Tokohu J. exper. Med., 42, 114-133 (1942)

- MÜLLER-LIMMROTH, W. :
Elektrophysiologie des Gesichtssinns.
Springer Verlag (1959)
- NAGATA, M. : Photopic Flicker-ERG In Cases Of Congenital
Night Blindness And Total Color Blindness.
Docum. ophthalm., 18, 352-367 (1964)
- NOELL, W. : Elektrophysiologic Study Of The Retina
During Metabolic Impairment.
Am. J. Ophthalm., 35, 126-132 (1952)
- PIPER, H. : Über die Netzhautströme.
Arch. Anat. Physiol., 85, (1911)
- RIGGS, L. : Loc.Zit.: STRAUB, W.: Elektroretinogramm,
Springer Verlag (1960)
- RIGGS, L.A., JOHNSON, E.P. u. VIDALE, E.B. :
Loc. Zit.: BORNSCHEIN, H.: Physiologische
Aspekte des Flimmerelektroretinogramms.
Komponenten und Frequenzcharakteristik.
Docum. Ophthalm., 18, 85-100 (1964)
- SACHS, E. : Die Aktionsströme des menschlichen Auges.
Klin. Wschr. 8, 136-137 (1929)
- SCHUBERT, G. u. BORNSCHEIN, H. :
Beitrag zur Analyse des menschlichen Elektro-
retinogramms.
Ophthalmologica (Basel), 123, 396-413 (1952)
- SICKEL, W. : Stoffwechsel und Funktion der isolierten
Netzhaut. Neurophysiologie und Psychophysik
des visuellen Systems.
Symposion Freiburg/Br., Springer, Berlin,
80-94 (1961)
- STRAUB, W. : Elektroretinogramm.
Springer Verlag (1960)
- STRAUB, W. u. HECK, J. :
Klinische Elektroretinographie. Normales
und pathologisches Elektroretinogramm.
Ber. 59. Vers. DOG, 60-66 (1955)

SVERAK, J. u. PEREGRIN, J. :

Contribution To The Physiology Of The Elektro-
retinographic Double-Flash Test.

Ophthalmologica (Basel), 140, 267-280 (1960)

TRENDELENBURG, P. :

Der Gesichtssinn.

Springer Verlag, Berlin (1943)

WAGMAN, I.H., WALDMAN, J., NAIDOFF, F., FEINSCHILL, L.B. u. CAHAN, R.:

The Recording Of The Elektroretinogram In
Humans And Animals. Investigation Of Retinal
Sensitivity Following Brief Flashes Of Light.

Am. J. Ophthalm., 38, 60-69 (1954)

YONEMURA, D., TSUZUKI, K. u. AOKI, T. :

Clinical Importance Of The Oscillatory
Potential In The Human Elektroretinogram.

Acta ophthalm. (Kbh.), Suppl. 70, 115-123 (1962)

ZETTERSTRÖM, B. :

Some Experience Of Clinical Flicker-Elektro-
retinography.

Docum. Ophthalm., 18, 315-330 (1964)

L e b e n s l a u f

Am 5. Juli 1942 wurde ich, Elke Groscurth, als Tochter des Volksschullehrers Ludwig Groscurth und seiner Ehefrau Anna-Maria, in Kassel geboren.

Nach dreizehnjähriger Schulzeit legte ich im Februar 1962 auf dem mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig der König-Heinrich-Schule zu Fritzlar das Abitur ab. Im Frühjahr des gleichen Jahres begann ich das Medizinstudium an der Philipps-Universität Marburg, wo ich am 5.3.1963 das Vorphysikum und am 27.10.1964 das Physikum bestand. Ende des zweiten klinischen Semesters im Juni 1965 nahm ich zur Erlangung des Doktorgrades obige Arbeit in der Universitätsaugenklinik Marburg an.

Meine Lehrer waren die Herren Professoren :

Beckmann, Berendes, Braun-Falco, Brück, Buchholz,
Bücher, Dimroth, Dittrich, Drawert, Exner, Gedigk, Hamm,
Hartmann, Hensel, Heuser, Hildebrandt, Jakob,
Karlson, Kessel, Lang, N., Lang, M., Linneweh, Löhr,
Lübbers, Mahr, Mann, Martini, Marx, Mattes, Neubauer,
Niessing, Petry, du Mesnil de Rochemont, Rohen,
Schleyer, Schmid, Schrappe, Schwaiger, Seidel, Siegert,
Straub, Streicher, Vogt, Walcher, Wendt, Würterle.

Herrn Prof. Dr. med. W. S t r a u b danke ich für die Überlassung des Themas und die Möglichkeit, in seiner Klinik zu arbeiten und alle erforderlichen Einrichtungen zu benutzen.

Frau Dr. med. B. S c h m i d t danke ich herzlich für Anregungen, Ratschläge und ihre stete Hilfsbereitschaft.

Mein Dank gilt auch Fräulein M. K e n k l i e s, die durch gewissenhafte Bedienung der Apparate zum Gelingen der Versuche beitrug.



